

BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN
IN DEN HOCHLAGEN DES BAYERISCHEN WALDES
UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DES MINERALKÖRPERS

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Claudia Hofmann-Schlelle

München 1988

1989





Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554824_0014

BODENKUNDLICHE UNTERSUCHUNGEN
IN DEN HOCHLAGEN DES BAYERISCHEN WALDES
UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DES MINERALKÖRPERS

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von

Claudia Hofmann-Schlelle

München 1988

1. Berichterstatter: Prof. Dr. K.-E. Rehfuess

2. Berichterstatter: Prof. Dr. U. Ammer

Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.1989

DANKSAGUNG

Herr Prof. Dr. Rehfuess gab mir die Anregung zu dieser Arbeit. Für sein stetiges, persönliches Interesse und für die Zeit zahlreicher und sehr lehrreicher Diskussionen möchte ich mich ganz besonders bedanken.

Dem Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten danke ich für die Finanzierung meiner Arbeit im Rahmen des Forschungsprojektes B47.

Des weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Wilke für die tatkräftige Hilfestellung während meiner röntgendiffraktometrischen Messungen am Lehrstuhl für Bodenkunde der Universität Bayreuth.

Herrn Dr. Storch danke ich für die Auswertung meiner Vegetationsaufnahmen, Herrn Dr. Froh für die Durchführung der REM-Untersuchungen.

Die Abteilung Bodenkunde des Bayerischen Geologischen Landesamtes stellte mir dankenswerterweise die Daten der Schwermetalluntersuchungen zur Verfügung.

Allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bodenkunde und Standortslehre der Fortwissenschaftlichen Fakultät München spreche ich meinen herzlichsten Dank für ihre Unterstützung während meiner Labortätigkeit aus, allen voran Fr. Praun, Fr. Heibl, Fr. Kern, Fr. Ruhl, Herrn Skrebsky, Herrn Dr. Schierl, Herrn Dr. Göttlein, Herrn Holzmüller und Herrn Bäumel.

Die Geländearbeit wurde durch die großzügige und hilfreiche Unterstützung der Forstämter Zwiesel, Kötzing und der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald sehr erleichtert. Herzlichen Dank, besonders den Revierleitern Herrn Thoma und Herrn Letsch sowie Herrn FAR Strunz.

Bei Renate, Barbara, Christian und Walter möchte ich mich dafür bedanken, daß sie mir nicht nur während der Endphase und Fertigstellung dieser Arbeit zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	
1.1.	Die Hochlagenerkrankung der Fichte (<i>Picea abies</i> Karst) im Bayerischen Wald.....	1
1.2.	Problemstellung.....	2
2.	Freilanduntersuchungen.....	3
2.1.	Auswahl der Untersuchungsgebiete.....	3
2.2.	Landschafts- und Waldgeschichte.....	6
2.3.	Methodik.....	8
2.3.1.	Kartierung und Auswahl der Leitprofile.....	8
2.3.2.	Schadensklassifizierung der Bestände.....	9
2.3.3.	Vegetationskundliche Aufnahmen.....	10
2.4.	Ergebnisse der Freilanduntersuchungen.....	10
2.4.1.	Die geographischen, geologischen, klimatischen, Immissions- und Depositions-Verhältnisse in den Kartiergebieten.....	10
2.4.2.	Schichtung bzw. Homogenität des Ausgangssubstrates.....	17
2.4.3.	Bodengesellschaften der Hochlagen.....	20
2.4.4.	Beschreibung der Bodentypen.....	24
2.4.4.1.	Terrestrische Böden.....	24
2.4.4.2.	Semiterrestrische Böden.....	30
2.4.4.3.	Moore.....	31
2.4.5.	Schadensklassifizierung der Bestände.....	31
2.4.6.	Bodenvegetation.....	33
3.	Bodenchemische Inventur.....	36
3.1.	Methoden.....	36
3.2.	Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....	39
3.2.1.	Korngrößenverteilung.....	39
3.2.2.	Sesquioxiddynamik.....	42
3.2.3.	Humuskörper, C ₁ -N ₁ - und P ₁ -Gehalte.....	53
3.2.4.	pH-Wert.....	56
3.2.5.	Gesamtgehalte weiterer Bioelemente.....	59
3.2.6.	Kationen-Austauschigenschaften.....	70
3.2.7.	Schwermetall-Gehalte.....	81
4.	Diskussion der Freiland- und Laboruntersuchungen.....	86
4.1.	Bodenentwicklung und Bodenformen.....	86
4.2.	Bodenphysikalische und chemische Eigenschaften der Hochlagenböden.....	88

5.	Silikatverwitterung.....	90
5.1.	Verwitterung und Pufferung.....	90
5.2.	Eigener Forschungsansatz.....	93
5.2.1.	Material und Methodik.....	94
5.2.1.1.	Mineralogische Untersuchungen.....	94
5.2.1.2.	Sequentieller Batch-Versuch.....	95
5.3.	Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen.....	100
5.3.1.	Primäre Silikate.....	100
5.3.2.	Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie.....	111
5.3.3.	Tonminerale.....	118
5.3.3.1.	Vorkommende Tonminerale und ihre mutmaßliche Entstehung...	119
5.3.3.2.	Unterschiede zwischen den Bodenformen und Ausgangsgesteinen.....	127
5.4.	Ergebnisse des sequentiellen Batch-Versuches.....	128
5.4.1.	pH-Wert.....	128
5.4.2.	Huminstoffe.....	130
5.4.3.	Al- und Fe-Freisetzung.....	132
5.4.4.	Ca-, Mg-, Na- und K-Freisetzung.....	136
5.5.	Diskussion der Untersuchungsbefunde zur Erfassung des Bestandes und der Verwitterung von Silikaten.....	141
5.5.1.	Mineralogische Ergebnisse.....	141
5.5.2.	Sequentieller Batch-Versuch.....	143
6.	Beziehung zwischen Boden und der Intensität der Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes.....	146
7.	Zusammenfassung.....	151
8.	Literaturverzeichnis.....	155
9.	Tabellenanhang.....	172

1. Einleitung

1.1. Die Hochlagenerkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst) im Bayerischen Wald

Unter Hochlagen versteht man im Bayerischen Wald die meist flach geneigten Oberhänge, Rücken und Sättel oberhalb von etwa 1150 m, die von subalpinen Fichtenwäldern (*Soldanello-Piceetum* Volk) bestockt sind.

Nach ELLING (1987) werden in den Hochlagen die Lockerbraunerden der oberen steilen Hanglagen von flachgründigen, mehr oder weniger stark podsolierten Böden über hoch anstehendem, verfestigtem Schutt abgelöst. BAUMGARTNER (zit.in.ELLING 1987) ergänzt aufgrund langjähriger Witterungs- und Temperaturbeobachtungen die geländemorphologischen, pflanzensoziologischen und edaphischen Charakteristika des Hochlagenbereichs noch durch den klimatischen Aspekt. Der Nebelniederschlag ist in dieser Höhenstufe bedeutend, die Jahresniederschläge sind mit 1300-1800mm relativ hoch und der Schnee bleibt ca. sieben Monate liegen.

Seit ca. 1980 wird in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes eine Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst) beobachtet, deren dominantes Symptom eine Vergilbung der Nadeln an älteren Jahrestrieben ist. Diese Vergilbung entspricht einer Mg-Mangelchlorose und ist von einer schwachen Ca- und Zn-Versorgung der betroffenen Bestände begleitet. Das Krankheitsbild tritt bei allen Altersgruppen der Hochlagen-Fichten auf und ist auf saure Böden mit geringer Basen- und hoher Al-Sättigung beschränkt.

Diese "neuartige" Schädigung der Fichte setzte offenbar bereits Mitte der 70-er Jahre in mehreren höheren Mittelgebirgen Zentraleuropas ein. In der BRD wurden erstmals 1975 im Fichtelgebirge (KREUTZER, pers. Mitt.) und im Nord- und Südschwarzwald (EVERS 1975, ZÖTTL 1977, zit. in ZÖTTL 1985) diesbezügliche Beobachtungen gemacht. Im Schwarzwald und im Bayerischen Wald findet man die betroffenen Bestände vorwiegend in Höhen von 800-1200m ü.NN.

Zur Erklärung dieser Hochlagenerkrankung der Fichte wurden im wesentlichen fünf teilweise konkurrierende Erklärungsansätze entwickelt, in denen mit wechselndem Gewicht Bodenversauerung-Blattauswaschung-subakute O₃-Belastung-Befall durch Pathogene und/oder Frostschocks für einen multifaktoriell bedingten Mg-Mangel verantwortlich gemacht werden (vgl.BOSCH 1986). Viele Wissenschaftler sehen in dem Zusammenspiel von mangelhafter Mg-(Ca-,Zn-)Ausstattung des Bodens mit atmosphärischen Faktoren (saure Deposition,Ozon,SO₂-Spitzenbelastung, N-Eintrag,Frostereignisse) und eventuellen genetischen Einflüssen die Ursache für die auffallende Vitalitätsschwäche, beschleunigte Nadelverluste und z.T. den Tod der Bäume (REHFUESS et al.1986).

Im Gebiet des Inneren Bayerischen Waldes stellt sich bzgl.dieser

Arbeitshypothese jedoch die Frage, warum die Mg-Mangelchlorose der Fichten nicht nur auf saurem Ausgangsgestein (Granit, Paragneis), sondern auch in Beständen auftritt, die auf Böden aus ultrabasischen, Mg- und Ca-reichen Amphiboliten (am Hohen Bogen) stocken. Im Gegensatz dazu wird im Fichtelgebirge auf Basaltstandorten trotz hohen Protonen-Eintrags nur eine geringe Schädigung der Bestockung beobachtet. Allerdings weisen diese Basaltbraunerden hohe Basensättigung auf. Auch im Südschwarzwald endet die Mg-Mangel-Vergilbung i.d.R. an der Grenze zwischen Mg-armen Graniten und Ca- und Mg-silikatreichen Gesteinen (z.B. Kulmschiefer; ZÖTTL pers. Mitt. 1988).

1.2. Problemstellung

Über das Zusammenspiel der Faktoren, die zu dem extremen Mg-Mangel der Fichten in den Hochlagen des Bayrischen Waldes und anderer Mittelgebirge führen, und über deren spezifische Gewichtung herrscht Unklarheit. Das Ausmaß der chemischen Veränderungen von Waldböden unter dem Einfluß saurer Deposition und ihre Bedeutung für das Zustandekommen der Walderkrankung (z.B. als disponierende Faktoren) ist umstritten (vgl. ULRICH et al. 1979; ZÖTTL et al. 1983; REHFUESS 1983, 1987, 1988).

Somit ist die Rolle der Böden in dem komplexen Ursachengefüge der Hochlagenerkrankung der Fichte unklar. Nach ULRICH (1979) ist die durch das Zusammenwirken von atmogener Säure-(Schwermetall)Deposition und starker Nitrifikation in warmen Jahren ausgelöste Versauerung der Böden die wichtigste Ursache überhaupt, da sie zu extremem Mg-Mangel und toxischen Al- und Schwermetallkonzentrationen in der Bodenlösung führen soll. Auch soll bei Böden mit pH-Werten < 5 die Protonenpufferung durch Silikatverwitterung nicht mehr im notwendigen Maße möglich sein.

SÜSSER (1987) hingegen wies für Böden unterschiedlicher Basen-Ausstattung aus dem Fichtelgebirge nach, daß die Pufferkapazität für Protonen in den Mineralbodenhorizonten den jährlichen Protoneneintrag weit übertrifft. Allerdings erfolgte die Protonenneutralisation in den sauren Böden überwiegend an Aluminium-Hydroxiden und Aluminium-Hydroxysulfaten. SÜSSER vermutet in der starken Freisetzung von Aluminium einen Beitrag zur Mg-Verarmung der Böden und damit zur Schädigung der Bestände.

Von anderer Seite wird betont, daß die sich aus periglazialen Schuttedecken aus verschiedenen Magmatiten und Metamorphiten entwickelten Böden schon seit langem stark sauer, Mg-arm und Al-gesättigt sind, worauf u.a. die hohe Al-Belegung der Austauscher auch im Unterboden und in früheren Untersuchungen (DBG 1975) hinweisen.

Die Erkrankung tritt zudem im Bayerischen Wald auch auf ultrabasischem, Mg- und Ca-reichem Gestein auf, das eigentlich durch Verwitterung relativ viel Mg und Ca aufnehmbar in die Bodenlösung nachliefern sollte. Auch reichert sich das durch die z.T. mächtigen Roh-

humus-Auflagen passierende Niederschlagswasser mit organischen Komplexoren an, die das in der Lösung von Mineralbodenhorizonten potentiell toxische, freie Aluminium komplexieren und entgiften können.

Eine Entscheidung über die Bedeutung des Faktors Boden im Ursachengefüge der Fichten-Hochlagenerkrankung im Bayerischen Wald war bislang nicht möglich, da eine umfassende analytische Bearbeitung der Böden in dieser Höhenstufe fehlt.

Diese Studie versucht, die Böden vielseitig zu charakterisieren. Damit soll die Grundlage für das Verständnis der Fichtenerkrankung in den Hochlagen und die Rolle der Böden im Komplex der Schadfaktoren erarbeitet werden:

Eine großmaßstäbliche (1:10 000) Kartierung repräsentativer Boden-Kleinlandschaften leitet eine Inventur dieser spezifischen Bodenformen ein. Um ein möglichst großes Spektrum von Boden-Gesellschaften zu erfassen, wurden Kartiergebiete in Bereichen verschiedener Ausgangsgesteins ausgewählt: Granit, Paragneis und Amphibolit. Die kartierten Gebiete enthalten unterschiedlich stark geschädigte Fichten-Bestände.

In einem zweiten Arbeitsschritt werden typische Leitpedons aus den repräsentativen Boden-Kleinlandschaften umfassend morphologisch und chemisch charakterisiert, um ihre Genese, ihre Eigenschaften und ihre Dynamik beurteilen zu können.

Die Freisetzung von Na, K, Ca, Mg, Al und Fe aus Silikaten durch Verwitterung unter Protonenverbrauch ist ein für den Bioelementhaushalt von Waldökosystemen wichtiger Prozeß. Deshalb wird durch eine Bestandsaufnahme vorhandener Silikate einschließlich der Tonminerale versucht, das Potential der "nachschaffenden Kraft" durch Silikatverwitterung in diesen basenarmen Böden abzuschätzen. Gleichzeitig sollen über die Verteilung und den Zustand der Silikate die Verwitterungstiefe und -intensität sowie die Homogenität des Substrates beurteilt werden.

Ausgehend von den Kenntnissen über den Mineralbestand der Hochlagenböden auf verschiedenem Ausgangsgestein werden für ausgewählte Horizonte des durchwurzelten Bereichs im Labor sogenannte Batch-Versuche zur Erfassung der Nährstoff-Nachlieferung unter kontrollierten, einigermaßen realistischen Bedingungen durchgeführt. Diese Serie von Verwitterungsexperimenten soll Erkenntnisse über die Freisetzung von Alkali- und Erdalkalimetallen sowie von Fe, Mn und Al liefern. Auch soll das Pufferungsvermögen der Hochlagenböden auf diese Weise abgeschätzt werden.

2. Freilanduntersuchungen

2.1. Auswahl der Untersuchungsgebiete

Aus Abb.2.1. ist die Lage der untersuchten Bodengesellschaften ersichtlich:



Abb.2.1.: Geographische Lage der Untersuchungsgebiete.

▲= Bodeninventur und Silikatverwitterung
△= nur Verwitterungsstudien

HOHER BOGEN

Dieses Untersuchungsgebiet liegt im Forstamt Kötzing auf ultrabasischem Ausgangssubstrat (Amphibolit). Definitionsgemäß fällt dieser

Standort nicht unter die Hochlagen, da nur eine Höhe von 1000-1050m ü.NN erreicht wird und im Bestand die Buche z.T. bereits dominiert. Reine Fichtenhorste haben jedoch durchaus den Charakter typischer, grasreicher Hochlagenbestände. Der Buchen-Fichten-Altbestand zeigt nur schwache Vergilbungen, während im Jungbestand eine deutliche Gelbspitzigkeit zu beobachten ist. Dieser Standort wurde vor allem deshalb in die Untersuchungen miteinbezogen, weil nur an dieser Stelle im Bayerischen Wald ultrabasisches Gestein mit größerem Flächenanteil auftritt. Die hier untersuchten Pedons werden im folgenden mit der Bezeichnung -V- (V/A;V/B;V/C;V/D) gekennzeichnet.

ENZIANFILZ:

Das Gebiet liegt im Forstamtsbereich Zwiesel zwischen 1240-1300 m ü.NN. Das Ausgangssubstrat der Böden sind periglaziale Schuttdecken aus Paragneis. Neben einem sicher autochthonen, schwach-mittel geschädigten Altbestand ist ein stark geschädigter, auffallend vergilter, zusammenbrechender, 60-80 jähriger Fichtenbestand vertreten. Er ist aus Aufforstung einer Kahlfäche entstanden und gehört vermutlich einer falschen Provenienz an. Im folgenden werden dieser Standort mit -VII- und die Bodenprofile entsprechend mit VII/A;VII/B;VII/C;VII/D;VII/E;VII/F bezeichnet.

KOHLSCHACHTEN:

Dieses Untersuchungsgebiet repräsentiert einen schwach bis kaum vergilbten und nur wenig entnadelten, autochthonen Fichten-Altbestand auf Ca-silikatreichem Granit. Das Naturschutzgebiet Kohlschachten liegt im Forstamtsbereich Zwiesel in einer Höhe von ca. 1120-1160m ü.NN. In der weiteren Besprechung wird dieses Gebiet unter -II- (Pedons II/A;II/B;II/C) geführt.

RACHEL:

Das Kartiergebiet am Rachel liegt zwischen 1250 und 1452 m ü.NN im Nationalpark Bayerischer Wald; der Rachelgipfel bildet mit 1452m ü.NN die zweithöchste Erhebung im Inneren Bayerischen Wald. Das Ausgangsgestein ist Cordieritgneis mit eingeschaltetem Biotitgneis (BAUBERGER 1975). Im Bereich des Rachelsattels (vgl. Abb.2.5.) stockt ein 60-80-jähriger Fichtenbestand, der deutlich stark geschädigt ist. Der übrige Teil des Rachel-Südwesthanges ist von einem autochthonen, schwach-mittel vergilbten Fichten-Altbestand bestockt. Dieser Standort wird des weiteren mit -III- (Bodenprofile III/A;III/B;III/C;III/D;III/E) bezeichnet.

Die in der Abb.2.1. mit einem offenen Δ gekennzeichneten Gebiete

(Lackenberg und Lusen) wurden von einem Kollegen (FÖRSTER 1988) kartiert und umfassend bodenkundlich untersucht. Anhand seiner Untersuchungsdaten wählte ich jeweils zwei Leitpedons für die eigenen Untersuchungen über Silikatgehalte und für Verwitterungsstudien aus. Auf diese Weise sollte das Gesteins- und Bodenformenspektrum für diesen methodischen Ansatz verbreitert werden.

Die Rechts- und Hochwerte auf den entsprechenden topographischen Karten zur genauen Kennzeichnung der Lage der Bodenprofile sind der Tabelle A.1. im Anhang zu entnehmen.

2.2. Landschafts- und Waldgeschichte

Für die Bodenbildung ist die Landschaftsgeschichte von großer Bedeutung. So kann z.B. die im Laufe der Zeit erfolgte Erosion und die damit zusammenhängende Ab- oder Zufuhr von Bodenmaterial den Elementhaushalt eines Pedons im Vergleich zum Anstehenden völlig verändern. Im Tertiär herrschten günstige Bedingungen für eine intensive Verwitterung, die eine starke Abfuhr von Alkali- und Erdalkalitionen bedingten. In den Untersuchungsgebieten kommen diesem Aspekt und den periglazialen Solifluktionerscheinungen eine besondere Bedeutung zu.

Das ostbayerische Grundgebirge und somit auch der Innere Bayerische Wald wurde bereits vor der Oberkreidezeit (vor ca. 100 Mio a) stark gehoben und z.T. seiner Sedimenthülle beraubt. So ist bereits vor dem Tertiär eine starke Verwitterung abgelaufen. Die tropisch-subtropischen und wechselfeuchten Klimaperioden des Tertiärs waren Zeiten einer besonders intensiven physikalischen und chemischen Verwitterung. Auf den tertiären (und älteren) Rumpfflächen bildeten sich tiefgründige Verwitterungsdecken. Die anstehenden Metamorphite und Magmatite vergrusteten zu mächtigen Zersatzzonen. In ihnen sind die ursprünglichen Strukturen des Gesteins noch vorhanden, meist aber soweit aufgelockert, daß der Zersatz grabbar ist. Diese Zersatzdecken bilden die tiefliegenden Reste der mächtigen tertiären Verwitterungsprofile, die in ihren oberen Bereichen durch Roterde-Bildung charakterisiert waren. Solche als Oxisols (US-Taxonomy) oder Ferrasols (FAO-Klassifikation) bezeichnete Böden sind nur selten erhalten geblieben und wurden in Resten nur an der Sohle von zwei Bodenprofilen am Standort Hoher Bogen gefunden.

Die Tatsache, daß Spuren tertiärer Verwitterung im Bayerischen Wald so spärlich auftreten, ist der intensiven physikalischen Verwitterung sowie der glazialen und periglazialen Erosion während des Pleistozäns zuzuschreiben. In den Hochlagen weisen Kare, Moränen und Findlingsblöcke auf eine begrenzte Vergletscherung hin (Rachel- und Arbergerbiet).

Durch den stellenweisen Abtrag älterer Verwitterungsdecken im Pleistozän kam es zu Felsfreistellungen vor allem an steilen Talflanken, auf Bergrücken und Gipfeln. Diese Felspartien unterlagen danach ihrerseits

starker periglazialer Frostverwitterung; der so entstandene Blockschutt überrollte noch erhalten gebliebenen oder auch schon umgelagerten älteren Verwitterungsschutt und wurde mit diesem zusammen durch Solifluktion hangabwärts transportiert.

Auf diese Weise entstanden vor allem oberhalb 800m ü.N.N. Solifluktionsschuttdecken unter dem Einfluß des Periglazialklimas (vgl. Kap. 2.4.1.), gegliedert in eine ca 30-80cm mächtige, locker und chaotisch gelagerte Haupt- und in eine darunterliegende, stellenweise mehrere Meter mächtige, dichte Basisfolge mit Paralleltexur. In der Regel war damit gegenüber den intensiv verwitterten Tertiärböden eine Verbesserung der Silikatausstattung und der physikalischen Eigenschaften (Wasseraufnahme, Wasserspeicherung und Belüftung) verbunden (FRIEHAUSER 1958, STAHR 1979).

Man darf aufgrund der heutigen Klimadaten vermuten, daß die periglazialen Bedingungen in den Hochlagen der Mittelgebirge länger anhielten als andernorts. Jedoch fehlen bislang sichere Alterskriterien, die den Beginn und den Ablauf der frühpostglazialen Wiederbewaldung als Gradmesser für das Ende der periglazialen Überprägung und des Tundrenklimas anzeigen. RUOFF (1932; zit. in ZIERL 1972) unterschied anhand pollenanalytischer Untersuchungen an zehn Moorprofilen mehrere waldegeschichtliche Perioden für die montane Region des Bayerischen Waldes; dabei fällt die erste Bewaldung in die Kiefernzeit (8100-6500 Jahre v. Chr.).

Die holozäne Veränderung der Landschaft blieb gegenüber der tertiären und pleistozänen gering. Die Hauptgründe dafür sind die ununterbrochene Bewaldung im Postglazial und die mächtigen periglazialen Schuttdecken, die durch ihre hohen Infiltrationsraten unter natürlichen Verhältnissen Oberflächenabfluß und damit Erosion weitgehend verhindern (STAHR 1979).

Wenn auch die Fichte schon seit Beginn der Wärmezeit in den Hochlagen des Bayerischen Waldes stark vertreten ist (vgl. RUOFF 1932, zit. in ZIERL 1972), so hat sie ihre absolute Vorherrschaft doch erst vor ca. 500 Jahren angetreten. TRAUTMANN (1952, zit. in ZIERL 1972) verfolgte durch Pollenanalysen von Rohhumusprofilen die waldegeschichtliche Entwicklung in den Hochlagen. Er wies nach, daß der Aufbau der Rohhumusdecken in den Hochlagen mit dem Anfang der Fichten-Kiefernzeit, also frühestens etwa mit dem 14. Jhrh. beginnt. Aus dem Befund, daß unter Bergmischwald-Beständen im Gegensatz zu Fichtenreinbeständen der Tal- und Hochlagen kein Rohhumus auftritt und aus dem Fehlen von Getreidepollen in den Rohhumusdecken der Hochlagen, zieht TRAUTMANN den Schluß, daß während des allgemeinen Übergangs von der Buchen-Tannen-Fichten- (800v.Chr.-1400 n.Chr.) zur rezenten Fichten-Kiefernzeit in den Hochlagen des Bayerischen Waldes Bergmischwälder zu reinen Fichtenwäldern wurden. Die Ursache muß in jener Klimaverschlechterung gesehen werden, die von verschiedenen Autoren (FIRBAS, LOSERT 1949, zit. in ZIERL 1972) für den fraglichen Zeitabschnitt nachgewiesen ist.

Der Beginn der rezenten Fichtenzeit fällt mit der ersten Rodungsperiode im 12. und 14. Jhrh. im Inneren Bayerischen Wald zusammen. Eine

starke Holznutzung mit Auflichtung der Waldbestände bewirkte die Bergbau- und Glashüttenindustrie vor allem im 16. bis 18. Jhrh.. Den Glashütten war bei ihrer Gründung die Waldweidenutzung für so viel Stück Vieh zugestanden worden, wie sie zur Unterhaltung ihrer Belegschaft und zum Holztransport benötigten. Ende des 17. Jhrh. war die Waldweide die gravierendste Nebennutzung.

Mit Beginn der geregelten Forstwirtschaft zu Beginn des 18. Jhrh. ging auch die Waldweide zurück und wurde nach dem 1. Weltkrieg fast überall abgeschafft (SEYFERT 1975). Viele Schächten zeugen noch heute von dieser Bewirtschaftung des Hochlagenwaldes; einzelne sind noch heute bestossen (z.B. am Kleinen Arber).

Spuren eines einschneidenden Ereignisses in der Waldgeschichte des Inneren Bayerischen Waldes sind heute noch insbesondere in den Hochlagen zu verfolgen. Im Dezember 1868 und Oktober 1870 gingen zwei Sturmkatastrophen über den Bayerischen Wald hinweg, denen neben den Auwaldbeständen in den Talkesseln vor allem die Hochlagenbestockung weitgehend zum Opfer fielen. Nach den Sturmbrüchen wurde eine Masservermehrung verschiedener Borkenkäfer beobachtet, die im Sommer 1873 ihren Höhepunkt erreichte und erst 1876 ausklang.

In den Hochlagen dehnten sich neben den erhalten gebliebenen Bestockungsresten kahle oder nur ganz spärlich mit Oberholz bestockte Windbruchflächen aus. Die Wiederbestockung dieser Kahlflächen erfolgte vorwiegend durch Pflanzung, da Verjüngung durch Saat nur stellenweise zum Erfolg führte. Diese Aufforstungsbemühungen waren nach ca. drei Jahrzehnten abgeschlossen. Die in den Jahren der Wiederbestockung fehlenden Kenntnisse über die Bedeutung der Saatgutherkunft zusammen mit dem großen Bedarf führte zur Verwendung auch nicht standortsgerechter Herkunft, was vor allem auf diesen Extremstandorten nicht ohne Folgen blieb. So weisen die in jener Zeit begründeten Bestände häufig starke Schnee-, Eis- und Windbruchschäden auf.

Auch fallen sie i.d.R. im Gegensatz zu den autochthonen Hochlagenfichten durch eine stärkere Gelbspitzigkeit der älteren Nadeljahrgänge auf.

Die waldgeschichtlichen Daten sind aus ZIERL (1972) entnommen.

2.3. Methodik

2.3.1. Kartierung und Auswahl der Leitprofile

Die Inventur der Hochlagenböden wurde durch eine großmaßstäbliche Kartierung der jeweiligen Untersuchungsgebiete in den Sommermonaten 1985 und 1986 eingeleitet.

Als Kartierungsunterlagen verwendete ich die Waldwirtschaftskarten 1:10 000 mit Höhenschichtlinien. In einem Raster von 50x50m wurden die einzelnen Standorte mit einem Pürckhauer-Bohrer abgebohrt; es folg-

te die Beschreibung jedes Bohrstockprofiles. Wo aufgrund morphologischer als auch vegetationskundlicher Kriterien ein kleinflächiger Bodenwechsel zu erwarten war, reduzierte ich die Bohrabstände.

In den einzelnen Untersuchungsgebieten wurden folgende Flächen kartiert:

- KOHLSCHACHTEN (II) = 48 ha
- RACHEL (III) = 48 ha
- HOHER BOGEN (V) = 17 ha
- ENZIANFILZ (VII) = 27 ha

Die Bohrpunkte bzw. die zugehörigen Bodenformen wurden in die Kartenunterlagen übertragen. Anschließend schied ich anhand der Bodenformenverteilung die Kartiereinheiten aus. Sie sind so definiert, daß mindestens 70% der Bohrpunkte der namengebenden Bodenform angehören (KNEIB 1984).

Pro definierter Boden- oder Kartiereinheit wurde in den Untersuchungsflächen ein typisches Leitprofil angelegt. Die auf diese Weise ausgewählten 18 Pedons wurden nach gängigen Standardverfahren (ELLING et al. 1984; Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde 1982) beschrieben und beprobt. Diese Proben kamen zur Analyse ins Labor. Eine volumenbezogene Beprobung war wegen des Skelettreichtums der Böden nicht durchführbar.

2.3.2. Schadensklassifizierung der Bestände

Um eventuelle Zusammenhänge zwischen bodenchemischen Kriterien und dem Gesundheitszustand der Bestände zu erfassen, führte ich in den Untersuchungsgebieten eine Schadensklassifizierung an bestimmten Bäumen durch. Hierfür wurden im August 1987 um jedes der 18 Bodenprofile 20 Bäume der KRAFT-Klassen 1-3 ausgewählt, nummeriert und nach der Arbeitsanleitung der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (1987) hinsichtlich Schadstufe beurteilt (Tab. 2.1.).

Schadstufe aufgrund Nadelverlust	Endstufe unter Berücksichtigung des Anteils der vergilbten Nadelmasse		
	1 (0-25%)	2 (26-60%)	3 (61-100%)
0	0	1	2
1	1	2	2
2	2	3	3
3	3	3	3

Tab. 2.1.: Kombinations-Tabelle zur Schadstufen-Klassifikation

Die Ergebnisse der Schadensklassifizierung wurden für je 20 Bäume/Profil arithmetisch gemittelt.

2.3.3. Vegetationskundliche Aufnahme

Ergänzend zur bodenkundlichen Inventur und zur Schadenssprache der Bestände wurde in den vier Kartierungsgebieten auf einer Fläche von ca. 100 qm um jedes der 18 Leitprofile im August 1987 eine vegetationskundliche Aufnahme durchgeführt. Die Aufnahmen wertete ich anschließend syntaxonomisch-ökologisch mittels eines EDV-Programmes aus. Dabei erfolgte die Berechnung von Zeigerwerten, Artengruppenanteilen und Ähnlichkeitskoeffizienten mit einfacher Gewichtung.

2.4. Ergebnisse der Freilanduntersuchungen

2.4.1. Die geographischen, geologischen, klimatischen, Immissions- und Depositions-Verhältnisse in den Kartierungsgebieten

GEOGRAPHIE

Die Staatsgrenze zwischen der BRD und der Tschechoslowakei folgt in etwa der Kammlinie des Mittelgebirgszuges, der früher zusammenfassend als Böhmerwald bezeichnet wurde (vgl. Abb. 2.1.). Heute versteht man unter Böhmerwald i. a. nur noch den Teil, der auf tschechoslowakischem Staatsgebiet liegt und nennt den nach Südwesten und Süden ausgerichteten Hauptabhang auf deutscher Seite den Hinteren oder Inneren Bayerischen Wald (FEHN 1959). Im Südwesten schließen sich das Hügelland der Regen-Senke und die Wegscheider Hochfläche sowie jenseits der Regen-Senke der Vordere Bayerische Wald an, dessen höchste Erhebungen zwischen 1000 und 1100 m ü. NN liegen.

GEOLOGIE

Auch geologisch wird das Gebiet des Bayerischen Waldes durch die von Nordwesten nach Südosten verlaufende Störungslinie des Pfahls in einen "Inneren" und einen "Vorderen" Bereich unterteilt.

Der Bayerische Wald liegt im südwestlichen Randgebiet der Böhmisches Masse. Er gehört zu deren ältestem Anteil, der moldanubischen Region, die seit dem Präkambrium (älter als 570 Mio. a.) keine große marine Transgression mehr erfahren hat (Bayer, GLA 1981). Dieses Gebiet lag schon zu Beginn der variszischen Gebirgsbildung (vor ca. 330 Mio. a.),

welche ihm die kristalline Prägung gegeben hat, als konsolidierter Festlandsblock vor. Im Bereich des bayerischen Moldanubikums nehmen Gneise und Granite, d.h. kieselsäureriche Gesteinstypen, den größten Raum ein. Glimmerschiefer und Phyllite sind nur kleinflächig vertreten. Intermediäre bis basische Gesteine kommen untergeordnet vor und haben außer im Gebiet des Hohen Bogen östlich von Furth i. Wald keine größere Verbreitung.

Die Paragneise entstanden aus präkambrischen, sandig-tonigen Schichten, die während der variszischen Orogenese (230-390 Mio a.b.p.) regionalmetamorph umgewandelt wurden. Im Zuge der variszischen Ära kam es zu umfangreichen Magmenbewegungen, die zur Intrusion des Gabbro vom Hohen Bogen und der weit verbreiteten Granite führten. Der Gabbro wurde während der Regionalmetamorphose amphibolitisiert und wird dementsprechend als Amphibolit angesprochen (BAYER, GLA 1965).

Die Metamorphite sind in der vorliegenden Studie durch die Paragneise an den Standorten Rachel (III) und Enzianfilz (VII) vertreten. Am Rachel liegt ein Cordierit-Gneis mit zwischengelagertem Biotit-Plagioklas-Gneis vor (BAUBERGER 1977), der aufgrund seines hohen Feldspat- und Quarzanteiles sehr hell wirkt. Der Gneis am Enzianfilz ist in seiner Ausprägung etwas dunkler.

Die Granite des Bayerischen Waldes sind teils fein-mittelkörnige, teils grobkörnige (Kristallgranit) Typen. Am Standort Kohlschachten (II) gehen mittel und grobkörnige Ausbildungen ineinander über, was sich auch in den Element-Gesamtgehalten der Bodenuntersuchungen widerspiegelt (vgl. Kap. 3.2.5.).

Der am Hohen Bogen (V) anstehende, feinkörnige Amphibolit stellt im Bayerischen Wald ein Exotikum dar. Das dunkle Gestein wird von einzelnen hellen, plagioklasreichen Bändern durchzogen. Im Mineralbestand überwiegen Fe- und Mg-reiche Hornblenden und anorthitreiche Plagioklase (ndl. Mitt. Dr. ROSE).

Für die Verwitterungsstudien an den Hochlagenböden wurden der Standort Lackenberg (I) auf Glimmerschiefer und der großflächig auftretende Ältere Finsterauer Kristallgranit miteinbezogen. Vom Standort Lusen (Kristallgranit; IV) lag bereits mineralogisches Datenmaterial vor.

Mit dieser Reihe von saurem Granit (über Glimmerschiefer) und Paragneis hin zum basischen Amphibolit decken die Untersuchungsgebiete die Spanne der in den Hochlagen des Bayerischen Waldes anstehenden Gesteine ab. Somit ist gewährleistet, daß die Untersuchungsergebnisse nicht durch die zufällige Auswahl von Standorten mit besonders günstiger, oder besonders ungünstigen geologischen Ausgangsbedingungen bestimmt sind.

PERIGLAZIALE DECKSCHICHTEN (AUSBILDUNG)

Die Böden in den Hochlagen des Bayerischen Waldes entwickelten sich aus periglazialen Schuttdecken, wie sie auch aus anderen Mittelgebir-

gen Zentraleuropas bekannt sind (SCHILLING u. WIEFEL 1962; SEMMEL 1964; STAHR 1975; FRIED 1984).

In allen 18 bodenchemisch untersuchten Pedons zeigte sich die charakteristische Gliederung dieser periglazialen Solifluktiionsdecken in eine Basisfolge und eine darüberliegende Hauptfolge. Die BASISFOLGE zeichnet sich durch dichte Lagerung und Einregelung der Skelettbrocken mit der Längsachse in Gefällsrichtung aus. Auf den größeren Steinen sind schluffig-lehmige Kappen zu finden, während die Unterseite feinerdefrei ist. In manchen Pedons treten innerhalb der Basisfolge besonders steinreiche Partien auf; hier waren die Steine mit humos-schmierigen Lagen überzogen. Dies deutet darauf hin, daß die Basisfolge nicht immer als eine durchgehende, kohärente, relativ undurchlässige Schicht im Liegenden der Hauptfolge anzusehen ist. Vielmehr treten Inhomogenitäten und Lücken auf, durch die das aus dem humosen Oberboden kommende Sickerwasser in tiefere "Grundwasserstockwerke" gelangt.

In den Profilen II/B und II/C des Standortes Kohlschachten war der Übergang der Basisfolge in die diese unterlagernde Zersatzzone des anstehenden Granits in ca. 1 m Tiefe aufgeschlossen.

Die HAUPTFOLGE ist im Profilanschnitt durch die völlig regellose Anordnung des Skeletts zu erkennen. I.d.R. liegt der Skelettgehalt der Hauptfolge deutlich unter dem der Basisfolge. Die Hauptfolge ist aufgrund ihrer lockeren Lagerung der Hauptwurzelbereich, der an der Grenze zur Basisfolge abrupt endet.

Wie die Durchwurzelung, so ist auch die holozäne Bodenentwicklung weitgehend auf die Hauptfolge beschränkt, zumal das als Folge der hohen Niederschläge reichlich anfallende Sickerwasser (1400 mm, BAUBERGER 1977) primär in dieser perkoliert. Die Verlagerungs- und Verwitterungsprozesse während der holozänen Bodenbildung verstärkten die Unterschiede an den Schichtgrenzen, was primär auf die unterschiedliche Durchlässigkeit von Haupt- und Basisfolge zurückzuführen ist. Die Hauptfolge ist auf den Plateaus und Verebnungen ca. 30 cm, in den Hanglagen wird sie bis maximal 60 cm mächtig.

Die Feinerde der Hauptfolge weist, abgesehen von den typischen Hochlagen-Podsolen, im Vergleich zur Basisfolge höhere Tongehalte auf. Dieser Befund wird einerseits durch die hohe holozäne und aktuelle Verwitterungsintensität in den Hochlagenböden, andererseits durch intensive Kryoklastik während des Periglazialklimas erklärt (vgl. Kap. 3.2. und 5.3.1.).

In allen vier Untersuchungsgebieten erreicht die Hauptfolge die Bodenoberfläche. Eine steinreichere Deckfolge, wie sie in größeren Höhenlagen anderer Mittelgebirge auftritt, wurde nicht beobachtet (SCHILLING und WIEFEL 1962; STAHR 1979; FRIED 1984).

ENTSTEHUNG DER DECKSCHICHTEN

Im Laufe der drei vergangenen Jahrzehnte wurden verschiedene Hypothesen über die Entstehung der periglazial stratifizierten Hangschuttdecken und ihre Differenzierung in verschiedene Schichten entwickelt. Eine chronologische Übersicht ist STAHR (1979) zu entnehmen.

Die Ausbildung und die Verbreitung der periglazialen Schuttdecken in den Hochlagen des Bayerischen Waldes machen eine Entstehung im Sinne der Hypothesen von FEZER (1953), FITZPATRICK (1956) sowie STAHR (1979) für wahrscheinlich. Diese Autoren nehmen an, daß die verschiedenen Schichten durch verschiedenartige Transportvorgänge geprägt wurden. So kann die Basisfolge als Solifluktionssediment aufgefaßt werden, das sich unter dem Einfluß der Schwerkraft hangabwärts bewegte (STAHR 1979). Das Material der Basisfolge entstammt der Zerfallszone, kann aber auch aus der Zersatzzone kommen, wie die Einmischung von tertiären Verwitterungsresten (Oxisolen) am Standort Hoher Bogen beweist. Die aktualistischen Untersuchungen FITZPATRICKS (1956) erklären die dichte Lagerung und Paralleltexur der Basisfolge als Ergebnis einer langsamen laminaren Translationsbewegung in den Eislinen (Verschiebung unter dem Druck des Hangabtriebs an Gitterebenen der Eiskristalle), verbunden mit periodischem langsamem Tauen und Gefrieren im Unterboden. Ebenso kann die hangparallele Skeletteinregelung auf laminare Bewegung zurückgeführt werden.

Die HAUPTFOLGE stellt nach STAHR und FITZPATRICK die ehemalige Auftauzone dar, die durch Kryoturbation und kryoklastischen Zerfall geprägt wurde, aus der Basisfolge abgeleitet werden kann und auch stellenweise eine Beimischung von Lokallöß aufweist. Die weitere Umlagerung am Hang erfolgte durch turbulente Solifluktion. Dadurch wurde der Schutt besser homogenisiert als in der Basisfolge. Rein kiesige Partien, wie sie in der Basisfolge anzutreffen sind, fehlen.

KLIMA

Die klimatischen Bedingungen der Untersuchungsstandorte sind recht einheitlich, da sie sich alle in einer ähnlichen Höhenlage (i.d.R. oberhalb 1100 m.ü.NN) am Südwest-Abhang des Mittelgebirgs-Hauptkammes befinden.

Nach BAUMGARTNER (1970, zit. in NOACK 1979) liegt das Gebiet des Bayerischen Waldes in der Zone der Luftmassen der gemäßigten Breiten im Bereich des planetarischen Westwindgürtels, jedoch bereits soweit landeinwärts, daß sich kontinentale meteorologische Einflüsse aus Südosten bemerkbar machen. Somit bildet der Hauptkamm dieses Mittelgebirges eine Klimascheide zwischen kontinental und maritim bestimmten Bereichen. Im Sommer liegt der Bayerische Wald häufig an der Ostflanke westlicher Hochdruckgebiete und im Stau der von Westen herauflaufenden

den Fronten. Dies und die Vb-Regenwetterlagen (europäischer Sommermonsun), die aus feuchter Luft aus dem Mittelmeerraum kommend, auf dem Weg nach Nordosten auch über den Bayerischen Wald ziehen und Täler wie Höhen tagelang mit Wolken und Regen verhängen, sind die Ursachen für den relativ großen Niederschlagsreichtum im Sommer.

Der Regen- bzw. Schnee-Niederschlag im Freiland erreicht in den Hochlagen 1300-1700 mm. Die Hochlagen stecken zudem etwa ein Drittel des Jahres in Wolken; dies führt zu einer Erhöhung des Niederschlages um bis zu 50% in Form der Nebeltraufe. Untersuchungen von BAUMGARTNER (1958b) zeigten für den Gipfelbereich des Großen Falkenstein (1307m ü.NN), daß dieser Nebelniederschlag oberhalb 1000 m ü.NN den Regenniederschlag sogar übertreffen kann. Die ökologische Bedeutung des Nebels für die Hochlagen liegt nach BAUMGARTNER (1958) in

- der Schwächung der Sonneneinstrahlung,
- der Hemmung der Transpiration in der mit Feuchtigkeit übersättigten Luft und in
- der Erhöhung des Niederschlages.

Zusätzlich können wegen der großen Oberfläche der Nebeltröpfchen und ihrer langen Verweildauer in der Atmosphäre besonders viele Aerosole (z.B. SO_4^{2-} , NO_3^-) und Gase (z.B. SO_2 und NO_x) aufgenommen werden; letztere reagieren in der Flüssigkeit zu H_2SO_4 und HNO_3 . Durch die lange Benetzung der Nadeln mit Nebel kann es zu höchstkonzentrierten Ablagerungen kommen, die nach dem Eintrocknen auf der Nadeloberfläche verbleiben (PAFFRATH et al. 1987).

Im Winter liegt der Bayerische Wald oft im Bereich des kalten osteuropäischen Hochdruckgebietes. Bei klarem Himmel kommt es zu tiefen Temperaturen. Das häufige Pendeln zwischen maritimen und kontinentalen Einflüssen und die Tiefdruckgebiete aus dem Adriaanraum verursachen den verhältnismäßig großen Schneereichtum (BAUMGARTNER 1970, zit. in NOACK 1979). Mit ca. 73 cm (gemessen am Großen Falkenstein in 1307m ü.NN) liegt die durchschnittliche Schneedeckenhöhe deutlich über Vergleichswerten aus Gebieten gleicher Höhenlage in den Bayerischen Alpen, im Schwarzwald und in der Rhön.

Zeitraum	Unterstellter Temperaturgradient je 100 m Höhenanstieg	Mitteltemperaturen für gleiche Meereshöhen liegen in den Alpen ... °C höher als im Bayer. Wald	Gleiche Mitteltemperaturen sind in den Alpen in einer um ... m größeren Meereshöhe anzutreffen als im Bayer. Wald
Jahr	-0.49	0.8-1.7	170-350
Sommermonate Mai-August	-0.62	0.2-1.3	30-210
Wintermonate Nov.-Februar	-0.31	1.1-2.2	300-740

Tab.2.2.: Temperaturgradient im Bayerischen Wald und in den Alpen (aus ELLING 1987).

Die Überlegene Schneedeckenhöhe gegenüber anderen deutschen Mittelgebirgen und den Alpen ist durch die im Bayerischen Wald in gleicher Höhenstufen deutlich niedrigeren Wintertemperaturen (und Sommertemperaturen) zu erklären (Tab.2.2.).

Die Schneedecke bleibt in den Hochlagen im Mittel sieben Monate liegen, wobei die bewaldeten Verebnungen und Plateaus beim Ausapern im späten Frühjahr hinter den Hanglagen zurückbleiben. Dieser Sachverhalt hat einen großen Einfluß auf die Pedogenese dieser Gebiete (vgl. Kap.2.3.5.).

Im Gegensatz zu den Niederungen liegen in den Hochlagen während der Wintermonate wesentlich mehr Sonnenscheintage vor, während im Sommer keine deutlichen Unterschiede auftreten. Dies mag in Verbindung mit den höheren Strahlungsintensitäten in den Gebieten oberhalb 1100m ü.NN für eine vermutete winterliche photooxidative Schädigung der Nadeln von Bedeutung sein (BOSCH 1986).

IMMISSIONS-und DEPOSITIONS-VERHÄLTNISSE

Neben den Hauptwindrichtungen West und Südwest treten im Untersuchungsgebiet an zweiter Stelle Winde aus Südosten auf.

Lufthygienische Messungen des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz zeigten im nordostbayerischen Grenzgebiet für den Meßraum 1977-1979 eine deutliche Erhöhung der SO_2 -Konzentrationen der Luft bei Winden aus östlichen Richtungen. Die Werte bei Westwinden entsprachen jenen eines dünn besiedelten Gebietes. Ein kurzzeitiges Auftreten von Spitzenwerten (größer $1\text{mg}/\text{m}^3$ für 30 Minuten Einwirkungsdauer) trat ebenfalls im Zusammenhang mit Luftströmungen aus östlichen und nördlichen Richtungen und länger anhaltender Inversionslage auf. In einem Fall ließen sich bei Winden aus vorwiegend nördlichen Richtungen zeitlich gestaffelte Zunahmen der SO_2 -Konzentration von Nord- bis nach Südbayern verfolgen. Dabei wurden an der Meßstation Kleiner Arber in einer Höhe von 1300m ü. NN noch Konzentrationen in der Größenordnung von $0.3\text{mg SO}_2/\text{m}^3$ im Halbstundenmittel registriert (Bayer.LfU 1982). Die von der JUFRO (1979, zit. in Bayer.LfU 1982) maximal zulässigen Halbstundenwerte liegen bei $0.25\text{ mg SO}_2/\text{m}^3$.

Aus diesen lufthygienischen Messungen wird der Einfluß einer kurzzeitigen SO_2 -Belastung als atmosphärischer Schädigungsfaktor für die multikausale Hochlagenerkrankung der Fichte deutlich.

In Kenntnis dieser Ergebnisse richtete die Bayrische Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt ab 1982/83 Niederschlags-Meßstationen in den höheren Lagen der nordöstlichen bayerischen Mittelgebirge ein, um sich einen Überblick über die anthropogen bedingte Stoffdeposition im Freiland und unter Bestand zu verschaffen (HÜSER et al. 1988). Interessant für die eigene Studie waren hier vor allem die dreijährigen Meßergebnisse am Standort Luchsplatzl (FA Bodenmais) in 1150m ü.NN am Südwesthang des Kleinen Arber. Eine Meßstation des Lehrstuhls

für Bodenkunde der LMU München wurde am gleichen Standort in einer Höhe von 950m ü. NN im Zeitraum 1980-1984 betreut.

Weiterhin wird im Rahmen des FVA-Forschungsprojektes B48 (Erfassung von Standort und Bestockung auf die Stofffracht im Sickerwasser von Waldbeständen des Nationalparks Bayerischer Wald) am Südwesthang des Lusen in 1203 m ü.NN der Bestandesniederschlag gemessen und analysiert.

Die Ergebnisse der Meßstationen am Luchsplatzl und am Lusen repräsentieren die Depositionsverhältnisse in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Sie sind in Tab. 2.3. im Vergleich zu anderen Meßstationen in Mittelgebirgslagen der BRD aufgeführt.

Gebiet	Höhe m ü.NN	Nieder- schlag mm/a	Meßzeitraum	H ⁺ / /	SO ₄ ²⁻ -S kg·ha ⁻¹ ·a ⁻¹	NO ₃ -N a ⁻¹	N _{ges.} / /
Lusen	1203	1702	11.86-11.87	2.1	45.2	10.1	19.8
Bodenmais	1150	1295	11.84-11.86	1.5	43.7	11.2	-
Bodenmais	950	1280	11.80-11.84	1.05	51.2	13.3	24.9
Solling	500	938	1969- 1985	3.15	83.1	15.7	31.2
Schluchsee	1100	1929	6.87- 5.88	0.36	11.02	5.07	9.6
Kälblescheuer	900	797	8.82- 8.83	0.79	13.4	-	19.9

Tab.2.3.: Jährlicher H⁺-,SO₄²⁻-S und N-Eintrag unter Fichtenbeständen (Kronentraufe) verschiedener Standorte der BRD (aus ZÖTTL 1985; HEIL 1988; HÜSER und REHFUESS 1988; BRAHMER mdl. Mitt.1988).

Die jährlichen Depositionsraten von Protonen, Sulfat-S und Stickstoff liegen im Bayrischen Wald z.T. deutlich über Vergleichswerten aus dem Schwarzwald (Schluchsee und Kälblescheuer). Jedoch erreichen am West-Abfall des Schwarzwaldes im Lee von Straßburg/Mannheim die Protonen-Einträge noch höhere Werte von 2.2.-3.0 kmolH⁺·xha⁻¹·xa⁻¹. In der Regel bleiben die Depositionswerte im Bayerischen Wald und im Schwarzwald jedoch deutlich hinter den in Norddeutschland (Solling) beobachteten Einträgen zurück.

Nach Untersuchungen von HÜSER und skandinavischen Wissenschaftlern (vgl.HÜSER und REHFUESS 1988) scheint der kritische Stickstoff-Eintrag bei etwa 20 kg N·xha⁻¹·xa⁻¹ zu liegen. Demnach erreichen die Stickstoff-

Depositionsraten sowohl in den Hochlagen als auch in den oberen Hanglagen (Standort Bodenmais, 950 m ü.NN) z.T. diesen Grenzwert. Es ist deshalb nicht ausgeschlossen, daß die Aufnahmefähigkeit der Hochlagen-Ökosysteme für Stickstoff bereits örtlich überschritten ist.

Die Niederschlagsmessungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes lassen in ihrer Tendenz einen positiven Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge, Protonen- und SO_4^{2-} -S-Eintrag erkennen. Die relativ hohen SO_4^{2-} -S-Depositionsraten sind außerdem durch den nicht unerheblichen Beitrag von Winden aus nordöstlicher Richtung zu erklären. Sie bringen erhöhte Schwefelkonzentrationen in Form saurer Aerosole und Gase aus dem tschechischen Egergebiet, wo schwefelreiche Braunkohle verbrannt wird.

Als weiterer Indikator für die SO_2 -Belastung eines Gebietes kann der Schwefelgehalt der Nadeln herangezogen werden. Untersuchungen an ein- bzw. zweijährigen Nadeln von Testbäumen in exponierten Lagen am Arbersattel und am Hohen Bogen ergaben Schwefelgehalte, die mehr oder weniger deutlich unterhalb der mit 1200-1500ppm angegebenen Schwellen für eine erhebliche anthropogene Erhöhung der Nadel-Spiegelwerte lagen (SCHÖNBORN et al.1981). Dagegen zeigten Nadelanalysen vom Standort Luchsplatzl (Bodenmais) mit 1258ppm im Jahr 1982 und 1566ppm im Jahr 1983 Gehalte an, die in der kritischen Größenordnung liegen (BOSCH 1986).

Wie im Südschwarzwald (ZÖTTL 1985) so wurde auch im Vorderen Bayerischen Wald (Meßstation Brotjacklriegel, zit. in BOSCH 1986) eine relativ hohe Belastung mit Ozon gemessen. Die winterlichen Durchschnittswerte liegen am Brotjacklriegel bei 50-60 $\mu\text{gO}_3/\text{m}^3$, die sommerlichen bei 100 $\mu\text{g O}_3/\text{m}^3$. Letztere erreichen die Größenordnung, bei der Schädigungen an der Nadeloberfläche durch Erosion und Strukturzerstörung der kutikulären und stomatären Wachse nicht ausgeschlossen sind (PRINZ et al.1982, zit. in ZÖTTL 1985).

Aus den Meßdaten der Station Brotjacklriegel geht weiter hervor, daß in den Hochlagen der für die tieferen Lagen typische Abbau des Ozons während der Nacht weitgehend unterbleibt, bedingt durch die häufigen Inversionslagen bei Hochdruckwetter.

2.4.2. Schichtung bzw. Homogenität des Ausgangssubstrates

Schon im Gelände wurde versucht, die einzelnen Schichten der Schuttfolgen in den Pedons aufgrund der Lagerungsdichte, der Bodenart und der Farbe zu erfassen.

Schichtung ist definitionsgemäß eine durch Veränderung der Sedimentationsverhältnisse bedingte vertikale Differenzierung von Körnung und/oder Mineralbestand (MURAWSKI 1977).

Da die Sedimentationsbedingungen, unter denen diese periglazialen

Schuttschichten abgelagert wurden, noch nicht im einzelnen bekannt sind, wird der Schichtungsbegriff in Anlehnung an STAHR (1975) erweitert: Schichtung liegt vor, wenn die vertikale Differenzierung von Körnung bzw. Mineralbestand in einem Sediment nicht durch die holozäne Bodenbildung erklärbar ist.

Die vertikale Differenzierung des pleistozänen Schichtpaketes wurde für alle 18 Pedons anhand des quantitativen Schichtungsnachweises nach STAHR(1975) überprüft. Im Bereich der Körnung (Kap.3.2.) wurde der Schichtungsparameter $\bar{Q}_K$ aus den Einzelparametern Sortierungskoeffizient (S_o) und mittlerer Durchmesser (M_d) zur Kennzeichnung des Gesamtsedimentes errechnet; ferner wurde der gS/mU -Quotient als Merkmal der Kristallinkomponente und der mS/gU -Quotient zur Dokumentation von Lößbeimengungen verwendet. Entsprechend den Anforderungen für Homogenitätsquotienten (SCHLICHTING und BLUME 1966) berechnete ich zusätzlich den Quotienten $m+gS/fS$, da diese groben Fraktionen trotz intensiver Verwitterung in den mehr oder weniger stark podsolierten Böden als relativ stabil angesehen werden können.

Das Vorgehen ist beispielhaft für die Pedons III/C (Braunerde-Podsol) und VII/B (Podsol) in Tab.2.4. erläutert. Die aufgeführten Schichtungsparameter lassen sich aus den Originaldaten in Tab.A.6.-A.9. im Anhang herleiten. Da es sich bei allen untersuchten Böden um sehr skelettreiche Sedimente handelt, betrachte ich eine Schichtung erst als erwiesen, wenn der Schichtungsparameter $\bar{Q}_K$ den Wert 1.5 überschreitet (vgl. STAHR 1975).

Die berechneten $\bar{Q}_K$ -Werte bestätigen für 14 von 18 Pedons die im Gelände ausgeschiedenen Schichtgrenzen zwischen Haupt- und Basisfolge und weisen sie als vertikale Diskontinuitäten aus. Neben diesen Grenzen 1. Ordnung treten gelegentlich auch Grenzen 2. Ordnung, also solche innerhalb der einzelnen Folgen auf (vgl. Tab.2.4.). Sie dürften überwiegend durch selektive Verarmung oder Anreicherung einzelner Fraktionen während des Transportes bedingt sein (STAHR 1979).

Für Pedon III/E (Hanggley-Podsol) am Standort Rachel konnte kein eindeutiger Schichtungsnachweis geführt werden; aufgrund der Feinerdekkörnung erwies es sich als völlig inhomogen. Da es sich um ein sehr skelettreiches Profil handelt (Skelett i.d.R. 63 mm), erfaßte die Probennahme nur "Zwickelfüllungen", die sicher kleinräumig in der Körnung stark voneinander abweichen.

Für die drei Pedons V/A, V/C und V/D (Tab.A.9.) am Standort Hoher Bogen war ebenfalls keine Übereinstimmung zwischen Geländebefund und quantitativen Schichtungsmerkmalen zu finden. Dies ist insbesondere für die Pedons V/C und V/D verwunderlich, da hier die Basisfolge nicht nur durch die üblichen Kriterien (Dichtesprung, Skelettgehalt, Schluffkappen), sondern zusätzlich durch die Einmischung fossilen, tertiären Bodenmaterials (Oxisols) deutlich im Profilschnitt zu erkennen war. In diesem Fall bestätigen jedoch die terrmineralogischen Untersuchungsergebnisse die Schichtung dieser Pedons (vgl. Tab.5.3.).

Neben den Körnungsparametern standen aus den Untersuchungen zur

Silikatverwitterung (Kap.5) für die Pedons III/A, III/C, V/D und V/D auch mineralogische Ergebnisse für einen quantitativen Schichtungsnachweis zur Verfügung. Dabei erwiesen sich die tonmineralogischen Befunde im Vergleich zu den Beobachtungen an primären Silikaten in der Feinsand- und Grobschlufffraktion als aussagekräftiger. Die Veränderungen in der Tonfraktion, die auf Substratunterschiede sensibel reagiert, spielten sich während der holozänen Bodenbildung vorwiegend in der Hauptfolge ab. Die Basisfolge hingegen kann als der von den holozänen Verwitterungsvorgängen weitgehend unbeeinflusste Solunabschnitt betrachtet werden (vgl. Tab.5.3. und 5.6.). Deshalb weisen die Tiefenfunktionen der Tonmineralspektren häufig besonders deutlich auf eine Schichtung innerhalb der untersuchten Pedons hin.

Pedon / Horizont	M_d	Q_M	S_o	Q_{S_o}	gS/mS	Q_{S1}	mS/FS	Q_{S2}	$mS/2U$	Q_U	$\bar{Q}_K$
<u>III/C</u>											
Ahe	0.048		2.17		0.86		1.73		1.55		
		1.85		1.33		1.12		1.13		1.67	1.42
Bvs	0.026		1.63		0.77		1.53		0.93		
		2.17		2.61		1.04		1.31		2.47	1.92
Bsv	0.012		4.26		0.74		2.0		2.3		
		1.0		1.12		1.78		1.29		1.33	1.30
Bv	0.012		4.77		1.32		2.59		1.73		
		7.08		1.62		3.07		2.33		1.41	3.10
IICvBv	0.085		2.94		0.43		1.11		1.23		
		1.06		1.27		4.07		1.14		1.95	1.90
BvCv	0.09		2.31		1.75		1.27		0.63		
<u>VII/B</u>											
Ahe	0.08		2.85		0.88		1.52		1.42		
		1.37		1.22		1.33		1.22		1.06	1.24
Bsh	0.11		3.49		1.17		1.86		1.5		
		1.74		1.40		1.03		1.08		1.61	1.37
Bhs	0.063		2.5		1.21		1.72		0.93		
		1.19		1.13		1.95		1.46		1.01	1.35
Bsv	0.075		2.82		0.62		1.18		0.94		
		1.36		1.00		1.40		1.06		1.40	1.23
Bv	0.055		2.81		0.87		1.25		1.23		
		3.63		1.38		1.46		2.66		2.23	2.27
IICvBv	0.2		3.97		1.27		3.33		2.75		
		1.05		1.10		1.03		1.63		1.13	1.19
GoBvCv	0.19		3.53		1.23		5.44		2.44		

Tab.2.4.: Ermittlung des quantitativen Schichtungsparameters $\bar{Q}_K$.
 M_d = mittlerer Durchmesser (Durchmesser bei 50% der Kornsummenkurve).
 S_o = Sortierungsgrad (Durchmesser bei 75% / Durchmesser bei 25% der Kornsummenkurve).
 $\bar{Q}_K$ = das arithmetische Mittel der einzelnen Quotienten (Q_M , Q_{S_o} , Q_{S1} , Q_{S2} und Q_U).

2.4.3. Bodengesellschaften der Hochlagen

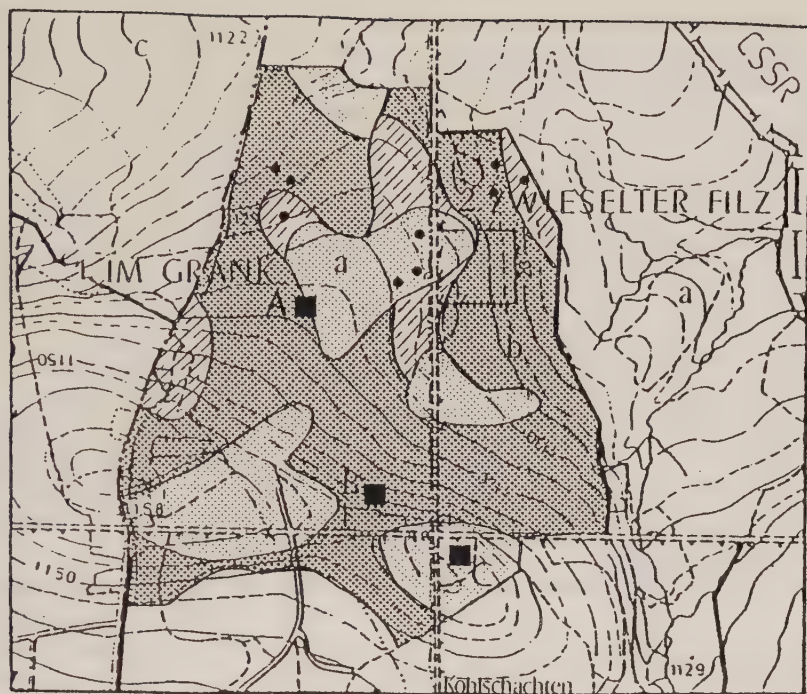
Das Verteilungsmuster der Bodenformen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes ist geprägt zum einen durch Höhenlage und Klimaverhältnisse, zum anderen durch das Geländere relief und die davon abhängige Mächtigkeit der Hauptfolge, welche ihrerseits die Abfluß- und Sickerwasser-verhältnisse bestimmen.

In den Plateau- bzw. Sattellagen der Untersuchungsgebiete auf sauren Ausgangsgestein (Kohlschachten, Rachel und Enzianfilz; Abb. 2.2., 2.3. und 2.4.) entwickelten sich flachgründige HOCHLAGEN-PODSOLE, die aufgrund ihrer Horizontfolge als Eisenhumuspodsole anzusprechen sind. Auf den Verebnungsflächen bleibt der Schnee gegenüber den Hangbereichen bis in den Frühsommer hinein liegen, zum einen bedingt durch kühlere Temperaturen infolge verminderten Luftaustausches, zum anderen durch besonders großer Schneehöhen (ELLING 1987). Aufgrund der fehlenden bzw. geringen Geländeneigung kann auf den Verflachungen das freiwerdende Schmelzwasser in dem geringmächtigen Hauptschutt nur langsam abfließen, was zu einer langanhaltenden Naßkalt-Phase führt. Das kühle Bodenklima, die hohe Wassersättigung des Bodens und die kurze Vegetationszeit beeinträchtigen die Mineralisation und Humifizierung der relativ schwer zersetzbaren Waldstreu (*Picea abies*, *Vaccinium myrtillus*, *Calamagrostis villosa*). Es kommt zur Bildung einer mächtigen Rohhumus-Auflage.

Die hohen Niederschlagsmengen laden sich beim Passieren durch die Auflage mit wasserlöslichen, niedermolekularen Huminstoffen (Fulvosäuren) auf, die im Oberboden reduzierend wirken und mobile metallorganische Komplexe bilden. Als Bodenart dominiert auf den Plateauflächen schwach lehmiger Sand, so daß die Perkolierbarkeit des Substrates groß ist und die metallorganischen Komplexe, Oxid-Hydroxidsole und möglicherweise auch (reduzierte) Ionen des Fe, Mn und Al in größere Tiefen verlagert werden; sie fallen dort teilweise an der Grenze Hauptfolge/Basisfolge wieder aus. Die gegenüber den Hängen gröbere Bodenart ist durch die geringere turbulente Solifluktion infolge des geringen Gefälles und wohl auch durch geringere Kryoklastik (langanhaltende Schneebedeckung) zu erklären. Die Hochlagen Podsole zeichnen sich durch eine maximale Entwicklungstiefe von etwa 30cm aus.

Auf ausgedehnten Plateaus bildeten sich infolge des behinderten Abflusses Moore (Filze). Zwischen diesen mehr zentral gelegenen Filzen und den Hochlagenpodsohlen vermitteln stellenweise GLEY-PODSOLE (Abb. 2.4.).

In den oberen, flach geneigten Hangbereichen werden die Podsole von BRAUNERDE-PODSOLEN abgelöst, deren Verarmungshorizonte häufig durch hohe Humusgehalte maskiert werden (maskierte Braunerde-Podsole; Abb. 2.4.). Ihre Zuordnung zum Haupttyp Podsol ist im Gelände nur aufgrund eines deutlich ausgebildeten, rotbraunen Anreicherungshorizontes möglich. Die Labordaten zeigen jedoch, daß die Intensität der Verlagerung von Fe in diesem Subtyp nur wenig hinter jener der typischen Hochlagen-Podsole zurückbleibt (vgl. Kap. 3.3.).



0 100 200 m



ZEICHENERKLÄRUNG

BRAUNERDEN



PODSOL BRAUNERDE



DISTRIKT GRENZE

PODSOLE



BRAUNERDE - PODSOL



UNTERABTEILUNGSGR.



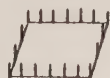
PODSOL



STEIG



AUFLAGE > 10 cm



ZAUN

Abb.2.2.: Bodengesellschaft am Standort Kohlschachten (Granit).

Die durch geringmächtigere Rohhumusauflagen (i.d.R. $< 10\text{cm}$) und auffallend humusreiche Eluvialhorizonte gekennzeichnete Braunerde-Podssole sind bestimmt durch ein rascheres Ausapern der Schneedecke im Frühjahr, schnelles Abfließen des Schmelz- und Sickerwassers und damit auch durch im Durchschnitt höhere Bodentemperaturen. Die Bodenart ist deutlich sandärmer und reicht von sandigem Lehm bis lehmigem Sand, so daß auch die Speicherleistung für Wasser größer ist. Alle diese Faktoren begünstigen die bessere Umsetzung der organischen Stoffe.

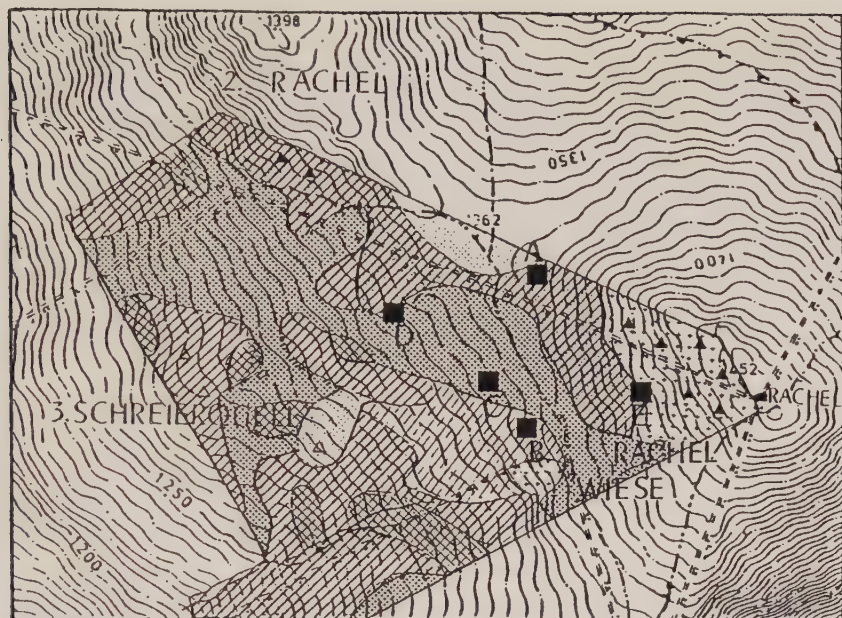
Unterhalb der durch Humus maskierten Braunerde-Podssole folgen meistens typische Braunerde-Podssole (Abb.2.2;2.3. und 2.4.), deren Eluvialhorizont deutliche Grautöne zeigt. Der Anreicherungs-horizont ist ebenfalls gut erkennbar. Auch hier erfolgt durch die günstigeren Bodenklima- und Wasserverhältnisse ein relativ rascher Umsatz der Streu, so daß die Rohhumus-Auflage nur noch ca. 5 cm mächtig ist.

Diesen mittelgründigen Braunerde-Podsolen schließen sich weiter hangabwärts bei einer Hangneigung zwischen $5-10^\circ$ PODSOL-BRAUNERDEN an (Abb.2.2;2.3 und 2.4.). An südseitigen und steileren Hängen reicht dieser Subtyp etwa 50 Höhenmeter weiter nach oben als an Nordhängen. Die größere Hangneigung begünstigt den hangparallelen Sickerwasserabfluß, so daß vertikale Podsolierung eher zurücktritt. Die beschleunigte mikrobielle Umsetzung der Streu spiegelt sich in einem durchschnittlich 10 cm mächtigen Aeh-Horizont und einer nur ca. 4 cm mächtigen organischen Auflage wieder..

Der Einfluß der Hangneigung für die Pedogenese wird besonders am Standort Rachel (Abb.2.3.) deutlich. Hier kommt es durch den raschen, vertikalen Abfluß des sauerstoffreichen Sickerwassers innerhalb der Hauptfolge zur Rostfleckbildung. Auf diese Weise entwickelten sich HANGGLEYE-PODSOLE, deren Ausbildung davon abhängt, wie stark das Sickerwasser sich beim Passieren der in der Gipfelregion vorkommenden BLOCK-HUMUS-BÖDEN mit metallorganischen Komplexen aufgeladen hat.

Der Rachel-Südwesthang ist oberhalb 1200m U.NN von zahlreichen Rinnsalen durchzogen, die nur in sehr warmen Sommern trockenfallen. Z.T. bildete sich an ihren Quellaustritten QUELLMOORE (Abb.2.3.), wobei dieser Moortyp auf die höheren Lagen (oberhalb 1050m) beschränkt ist. Das spricht für eine entscheidende Rolle des Klimas; auch dürften die niedrigen Temperaturen den austretenden Quellwassers bei der Torfbildung mitwirken (ELLING 1987). Unterhalb dieser hochgelegenen Quellmoore und entlang der kleinen Bachläufe treten HANGGLEYE auf. Sie weisen z.T. einen bis zu 20 cm mächtigen Aa-Horizont auf und sind somit stellenweise als Annmoorhanggleye anzusprechen.

Am Standort Hoher Bogen auf ultrabasischem Amphibolit stellen die Podsol-Braunerden die am stärksten podsoliierten Entwicklungsstadien dar, die vorwiegend auf flach bis schwach geneigten Hangbereichen vorkommen (Abb.2.5.). Das günstigere Klima dieses Standortes wird durch einen hohen Buchenanteil und auch durch das vereinzelte Auftreten der Tanne bestätigt. Die etwas höheren Temperaturen und eine leichter zersetzbare Streu führten zur Ausbildung eines (rohhumusartigen) Moders, was die schwächere Podsolierung im Vergleich zu den Standorten



ZEICHENERKLÄRUNG :

	BLOCK-HUMUS-BODEN		STARKE BLOCKÜBERLAGERUNG
BRAUNERDEN			SCHWACHE BLOCKÜBERLAGERUNG
	PODSOL-BRAUNERDE		
PODSOLE			SCHNEISE
	BRAUNERDE - PODSOL		STEIG
	PODSOL		
	HANGGLEY - PODSOL		
GLEYE			
	(ANMOOR) - HANGGLEY		
MOORE			
	QUELLMOORE		

Abb.2.3.: Bodengesellschaft am Standort Rachel (Paragneis).

auf saurem Ausgangssubstrat erklärt. An den etwas stärker geneigten Hängen finden sich in diesem Untersuchungsgebiet mittelgründige PODSOLIGE BRAUNERDEN, die außer dem Auftreten von freien Quarzkörnern im Oh und A(e)h keine weitere Podsolierung erkennen lassen.

Aufgrund kleinräumiger Variation in der Mächtigkeit der Hauptfolge sowie des Wasser -und Lufthaushaltes kommen die kartierten Bodenformen in den untersuchten Gebieten nicht als weitflächig gleichartige Areale vor. Vielmehr handelt es sich um eine mosaikartige Vergesellschaftung verschiedener Bodenformen, in der eine Leitform dominiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde diese nach statistischen Gesichtspunkten (vgl. Kap. 2.3.1.) definiert und in den Bodenkarten dargestellt. Trotz dieser mosaikartigen Vergesellschaftung wird auf allen Standorten die höhenzonale Abhängigkeit der Bodenentwicklung in den Hochlagen des Bayerischen Waldes deutlich (vgl. ELLING 1987).

2.4.4. Beschreibung der Bodentypen

2.4.4.1. Terrestrische Böden

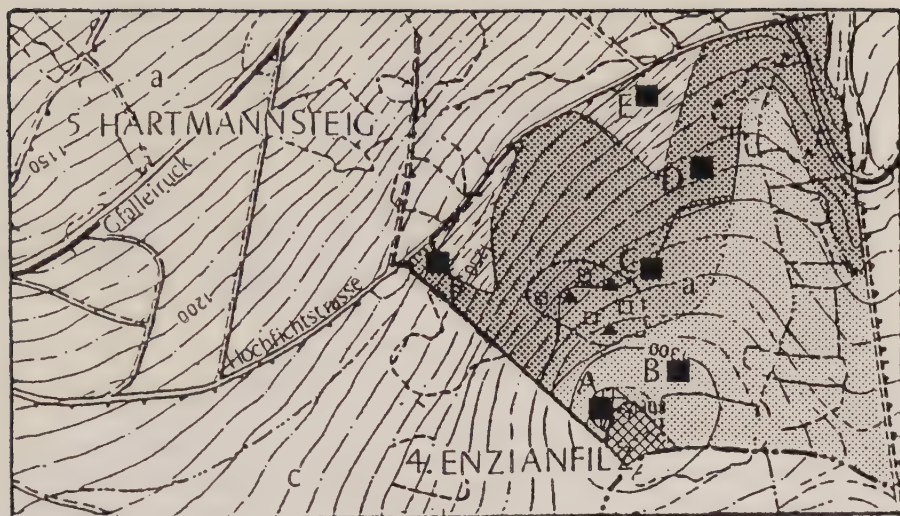
Bei der Beschreibung der einzelnen Bodentypen wird primär auf die in der Hauptfolge ausgebildeten, für die genetische Zuordnung der Böden wichtigen Horizonte eingegangen. Die Basisfolge ist mit Ausnahme des Standortes Hoher Bogen, wo fossile Tertiärböden eingemischt sind, auf allen Standorten ähnlich (vgl. Kap. 2.4.2.)

Da die Humusgehalte in den A-Horizonten der Hochlagenböden i.d.R. sehr hoch liegen (z.B. in Aeh-Horizonten zwischen 11 und 22%), mußte ich bei der Benennung der Horizonte von den üblichen Kriterien der "Systematik der Böden der BRD" (DBG 1985) Abstand nehmen. Auch hinsichtlich der Bezeichnung der Anreicherungs horizonte konnte aufgrund der den Hochlagenböden eigenen Dynamik die C_p/Fe_p -Quotienten (vgl. DBG 1985) nicht als Kriterium verwendet werden.

BLOCK-HUMUS-BODEN

In Anlehnung an ELLING (1987) werden jene Böden als Block-Humus-Böden bezeichnet, die durch das allmähliche Auffüllen der Hohlräume eines Blockfeldes mit Humus (△dem Oh einer organischen Auflage) und mit stark humoser, mineralischer Feinerde entstehen. Rohhumuspolster überziehen in wechselnder Stärke die Blöcke. Die Mächtigkeit der Blockanhäufungen, die z.B. unterhalb des Rachelgipfels auftreten, ist nicht bekannt.

Die humosen Füllungen zwischen den Blöcken lassen eine gute Durchlüftung und eine ungehemmte Sickerwasserbewegung zu.



ZEICHENERKLÄRUNG :

BRAUNERDEN :



: PODSOL-BRAUNERDE

□ SEHR FLACHGRÜNDIG

PODSOLE :



: BRAUNERDE-PODSOL

▲ STARKE BLOCKÜBERLAGERUNG



: MASKIERTER BRAUNERDE-PODSOL

≡ DISTRIKTGRENZE



PODSOL

— ABTEILUNGSGRENZE



GLEY-PODSOL

— UNTERABTEILUNGSGR.

MOORE :



FILZ

... STEIG

Abb.2.4.: Bodengesellschaft am Standort Enzianfilz (Paragneis).

BRAUNERDEN (FAO:Dystric Cambisols; USDA:Dystrochrepts)

In dem Bodentyp Braunerde werden solche Böden zusammengefaßt, die ein A-Bv-C-Profil mit folgenden Eigenschaften besitzen:

- Als Farbton dominiert ein gelbstichiges Mittelbraun (10YR 5/6 und 10YR 4/4) im gesamten Profilanschnitt.
- Im Gelände läßt sich nicht bzw. nur andeutungsweise ein Anreicherungs-Horizont ausscheiden. Die Fe_d -Gehalte liegen im B-Horizont höchstens 30% höher als im Aeh-Horizont. Die Gehalte an Mangan-Oxiden erreichen ihr Maximum i.d.R. erst in der Basisfolge.

**a) podsolige Braunerden- O-A(e)h-B(s)v-Bv-IICvBv
(FAO:Spodic-Dystric Cambisols; USDA:Dystrochrepts):**

Dieser Subtyp ist nur am Standort Hoher Bogen (Amphibolit) in einer Höhe zwischen 1000 und 1050 m ü.NN vertreten. Die Bodenart ist, entsprechend dem feinkörnigen Ausgangsgestein, sandiger bis toniger Lehm, der in der Basisfolge in schluffig-lehmigen Sand übergeht. Der Skelettgehalt liegt i.d.R. in der Hauptfolge bei 30% und steigt in der Basisfolge sprunghaft auf über 60% an.

Entsprechend der genetischen Zuordnung zeichnet sich dieser Subtyp bereits durch eine deutliche Mn- und Al-Verlagerung aus. Freie Quarzkörner im A(e)h deuten auf eine beginnende Eisen-Wanderung (Differenz Ah/Bv max. 5%) hin. Als Humusform kommen Übergänge vom feinhumusreichen zum rothumusartigen Moder vor.

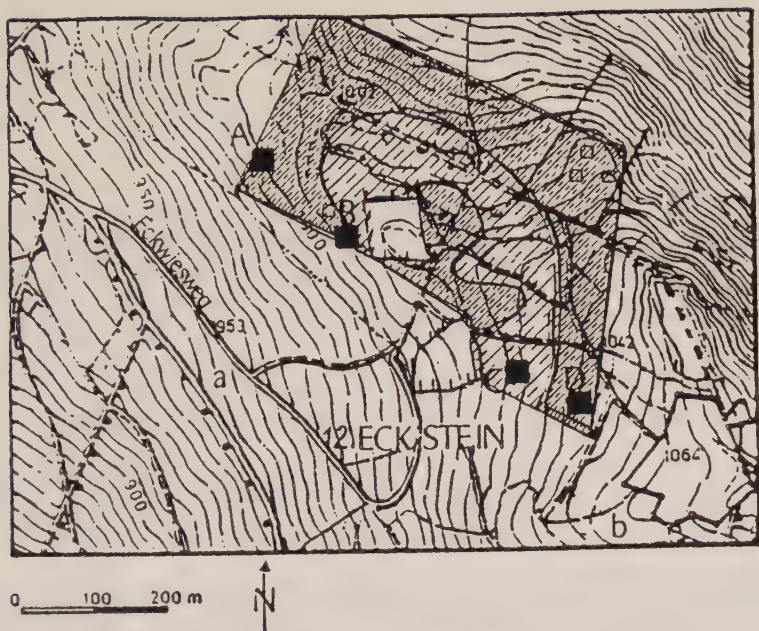
**b) Podsol-Braunerden- O-Aeh-Bsv-Bv-IICvBv
(FAO:Spodic-Dystric Cambisols; USDA:Dystrochrept)**

Am Standort Hoher Bogen sind die Podsol-Braunerden auf flachere Geländebereiche beschränkt. In den Untersuchungsgebieten Kohlschachten (Granit), Rachel und Enzianfilz (Paragneis) treten sie hingegen vorwiegend an den steileren Unterhängen der Hochlagen zwischen 1100 bis 1200 m ü.NN auf. Dieser mittelgründige Subtyp entspricht den "schokoladenbraunen" Waldböden von PELIŠEK (1969).

Die Humusform ist am Hohen Bogen rothumusartiger Moder, auf Granit und Paragneis-Standorten hingegen feinhumusreicher Rohhumus.

Die Bodenart variiert gemäß dem Ausgangssubstrat von schluffigem Lehm und sandig-tonigem Lehm (Amphibolit) bis schluffigem Sand (Granit und Paragneis) in der Hauptfolge. In der Basisfolge liegt sandig-lehmiger Schluff oder schluffig-lehmiger Sand vor.

Im Gegensatz zu den podsoligen Braunerden ist im oberen Teil des B-



ZEICHENERKLÄRUNG :

BRAUNERDEN :



PODSOLIGE BRAUNERDE



PODSOL-BRAUNERDE



SEHR FLACHGRÜNDIG



MILITÄRISCHES GEBIET



DISTRIKTGRENZE



ABTEILUNGSGRENZE



STRASSE



STEIG

Abb.2.5.: Bodengesellschaft am Standort Hoher Bogen (Amphibolit).

Horizontes ein rotstichiges Braun (7.5YR 4/4) zu erkennen, dem eine Eisenverlagerung von maximal 30% aus dem A-Horizont entspricht. Die humusreichen (14-18%) Aeh-Horizonte sind violettstichig (5YR 3/1).

PODSOLE (FAO:Podzols; USDA:Spodosols)

Zu diesem Bodentyp werden Böden gestellt, die ein A(h)e-Bhs-IICvBv-Profil aufweisen. Im Vergleich zur Braunerde steigen die Gehalte an pedogenem Eisen vom A-in den B-Horizont um mehr als 30% an.

In der Hauptfolge liegt der Skelettanteil zwischen 10-40%, in der Basisfolge erreicht er bis zu 70%.

**a) Eisenhumuspodsol- O-Aeh-A(h)e-Bsh-Bhs-Bsv-II/CvBv
(FAO:Orthic-Podzol; USDA:Haplorthod)**

Die typische Ausbildung der flachgründigen Hochlagen-Podsole gehört systematisch zu den Eisenhumuspodsohlen. Sie entwickelten sich auf den Plateaus und Verebnungsflächen (Kap.2.4.3.) aus tonarmem Schutt unter feinhumusarmem bis feinhumusreichem Rohhumus.

Ein meist nur etwa 1 cm mächtiger Aeh-Horizont geht in einen hellgrauen, (10YR 6/1) Ae mit der Bodenart schwach lehmiger Sand über. Deutlich abgegrenzt folgt darunter ein aufgrund von Humus- und Sesquioxideinspülungen dunkel-rotbraun gefärbter (5YR 3/2) Bhs-Horizont, gefolgt von einem deutlich rotbraunen (5YR 4/8) Bs-Horizont. Der Anstieg der Fe_2 -Gehalte vom A-in den B-Horizont ist größer als 100%.

Die Bodenart der Illuvial- und des darunterliegenden, zur Basisfolge überleitenden, gelbbraunen (10YR 5/8) Bsv-Horizontes ist stark lehmiger bis schluffig-lehmiger Sand. Die Durchwurzelung beschränkt sich wie bei allen Bodentypen der Hochlagen auf die Hauptfolge.

**b) Braunerde-Podsol- O-Aeh-Ahe-Bvs-Bsv-Bv-IICvBv
(FAO: Leptic-Podzol; USDA:Haplorthod)**

Wo die Verebnungen in die flach geneigten Oberhänge übergehen, werden die flachgründigen Podsole i.d.R. von mittelgründigen Braunerde-Podsohlen abgelöst. Beim typischen Braunerde-Podsol ist der Eluvial-horizont relativ deutlich ausgebildet und an seinem auffallenden Grauton zu erkennen (7.5YR 5/2; 5YR 4/1). Ihm steht ein sehr deutlich ausgeprägter Illuvialbereich gegenüber (5YR 3/4 und 4/6). Der Bs enthält 30-100% mehr Fe_2 als der Ahe.

Die Bodenart der Hauptfolge variiert von sandigem Lehm bis stark lehmigem Sand, in der Basisfolge dominiert ein schluffiger bis schwach

lehmiger Sand. Die Humusform entspricht einem Rohhumus, dessen Auflage aber gegenüber den Hochlagen-Podsolen meist geringmächtiger ist (5-8 cm).

c) Maskierter Braunerde-Podsol- O-Aeh-Bvhs-B(v)s-Bsv-IICvBv
(FAO: Leptic Podzol; USDA: Haplorthod)

Selten werden die typischen Braunerde-Podsole von der Varietät "maskierter Braunerde-Podsol" vertreten. Ihr Eluvialhorizont ist durch hohe Humusgehalte (ca. 30%) maskiert (5YR 3/2); die Bodenart entspricht jener der Eisenhumuspodsole. Während beim Haupttyp Podsol neben einer Humuseinspülung eine Verlagerung an pedogenem Eisen von über 100% vorliegt, steigen im Subtyp Braunerde-Podsol die Fe_d -Gehalte vom A- zum B-Horizont um) 30-100%. Eine Zuordnung zum Bodentyp Podsol war im Gelände nur aufgrund des deutlich rotbraunen B-Horizontes (5YR 4/8) möglich.

Diese Varietät "maskierter Braunerde-Podsol" trat nur am Standort Enzianfilz auf.

d) Gley-Podsol- O-Aeh-Bsh-B(h)s-GoBvs-(Bv)Gr-IICvBv
(FAO: Gleyic Podzol; USDA: Cryaquod)

Auf ausgedehnten Plateaulagen, wie sie am Standort Enzianfilz vorliegen (Abb. 2.4.) kommt es infolge der hohen Niederschläge, des späten Abschmelzens der Schneedecke und des stark behinderten Abfließens von Niederschlags- und Schmelzwasser stellenweise zur Hochmoorbildung (Filz).

Zwischen diesen Filzen der zentralen Verflachung und den Eisenhumus-podsolen der äußeren Plateauränder entwickelten sich unter einer bis 25 cm mächtigen, nassen Rohhumus-Auflage kleinflächig Gley-Podsole. Dabei folgen unter einem humusreichen, graubraunen (5YR 3/1) Aeh-Horizont rotbraune (5YR 4/6 und 7.5YR 4/4) Illuvialhorizonte, in denen vereinzelt Mn-Konkretionen und linienförmig humusreiche Partien vorliegen. Die Mn-Konkretionen nehmen mit der Tiefe zu, gleichzeitig gehen die roten Farbtöne des Bodens zurück. Dieser Bereich entspricht einem GoBv-Horizont, der sich deutlich von einem darunter liegenden, olivgrünen (5Y 4/3) Reduktionshorizont (BvGr) in etwa 35 cm Tiefe abtrennt. Auch hier treten humusreiche, schlierige Partien auf. In 50 cm Tiefe ist die Basisfolge in ihrer für die Hochlagen typischen gelbbraunen (2.5YR 4/4) Ausbildung erreicht. Die Bodenart ist in der Haupt- und in der Basisfolge stark lehmiger Sand.

e) Hanggley-Podsol- O-Aeh-(Go)Ahe-GoBvs-Bv-IICvBv
(FAO: Gleyic Podzol on slopes; USDA: Cryaquod)

Dieser Subtyp ist speziell in den steilen Oberhängen des Rachelge-

bietet unterhalb der Block-Humus-Böden vertreten. Die hohen Niederschlagsmengen sickern rasch durch mit Humus und Feinerde aufgefüllten Blockspalten und reichern sich so mit löslichen organischen Stoffen an. Treffen diese mit Chelatoren angereicherten Sickerwässer unterhalb der Blockhalde auf mineralisches Substrat, mobilisieren sie dort vorwiegend Eisen, das später an pH- und Eh-Gradienten wieder ausgefällt wird. Somit dominiert in diesen Hanggley-Podsolen unterhalb der Block-Humus-Böden der laterale Transport gegenüber dem vertikalen; seine Intensität nimmt aber mit zunehmender Entfernung von den Block-Humus-Böden ab.

Die Hanggley-Podsole direkt unterhalb der Blockhalden zeichnen sich infolgedessen aus durch einen bis 40 cm mächtigen, dunkelrotbraunen (2.5YR 2/2) Illuvialhorizont, dem nur ein 1-2 cm mächtiger, schwach graustichiger Aeh (2.5 YR 3/0) gegenübersteht. In einiger Entfernung vom Blockhaldenbereich entwickelten sich bereits deutlich graustichige (5YR 4/1) Eluvialhorizonte von mehreren cm Mächtigkeit, in denen nur das Auftreten diffuser Rostflecken auf den langanhaltenden Einfluß eines sauerstoffreichen "Hanggrundwassers" hinweisen.

Die Bodenart dieses Bodentyps ist in der Hauptfolge ein lehmiger Sand, in der Basisfolge schluffiger Sand.

2.4.4.2. SEMITERRESTRISCHE BÖDEN

a) (Anmoor)-Hanggley- O-(Aa)- Ah-Go-Gor
(FAO: Gleysols on slopes; USDA: Mollic Haplaquepts)

Dieser Bodentyp entsteht unter ständiger Einwirkung von Hang-Grundwasser im 8-10° geneigten Mittelhangbereich des Rachel-Südwesthanges entlang von Bachläufen, die hier die Hänge durchziehen und z.T. aus Quellmooren gespeist werden. Sie sind auf einen Bereich zwischen 1250 m bis 1320m ü. NN beschränkt.

Infolge langanhaltender, hoher Wassersättigung des Oberbodens bildete sich ein 10-20 cm mächtiger, stark humoser Aa-Horizont, der i.d.R. von einem lockeren, stark grusigen, humusreichen AaGo unterlagert wird. Darunter folgt ein sandig-lehmiger, mäßig dichter, fahlbrauner, deutlich rostfleckiger Go-Horizont. Ein typischer Reduktionshorizont konnte mit dem Pürkhauer-Bohrer nur selten erfaßt werden. Meist geht der Go in ca 30 cm Tiefe in einen grünstichigen, gelbbraunen Gor-Horizont über.

Unter diesen feuchten Standortbedingungen setzt sich die Bodenvegetation i.a. aus einer Vergesellschaftung aus Calamagrostis und Sphagnum-Arten zusammen. Die permanente Wassersättigung des Bodens veranlaßt die Fichten, infolge Luftmangels extrem flach zu wurzeln, so daß die Bestände auf Hanggley-Standorten sich durch eine hohe Windwurfgefährdung auszeichnen.

2.4.4.3. Moore-H-Gor-Gr

Quellmoore -H-Gor-Gr

(FAD:Histosols; USDA:Borosaprist)

Auf die Eigenart der hochgelegenen Quellmoore wurde in Kap.2.4.3. bereits näher eingegangen.Sie treten in einer Höhe von 1250-1320m U.NN vergesellschaftet mit den Hanggleyen am Rachel-Südwesthang auf.

Die Mächtigkeit der organischen Auflage ist in der Regel gering (30- 60cm).Da die Quellmoore meist von zahlreichen Bachgerinnen durchzogen werden, schwanken die Mächtigkeit und Ausformung der organische Auflage auf kurzer Entfernung erheblich. Die Fichtenbestockung ist hier sehr schütter und kümmerlich. Wo die Torfdecke mächtiger als 50 cm wird, fehlt kleinflächig der Baumbestand.

2.4.5. Schadensklassifizierung der Bestände

a) KOHLSCHACHTEN (II)

Im Untersuchungsgebiet Kohlschachten (Granit) stockt ein autochthoner,licht geschlossener Fichtenhochlagenwald ,in den sich kleinflächig bereits die Buche mischt (Profil II/B und C,Abb.2.2.).Das Bestandesalter variiert zwischen 120 und 160 Jahren. Die Beurteilung der insgesamt 60 Bäume beschränkte sich ausschließlich auf den Fichtenanteil. Die durchschnittliche Schadstufe wies den Bestand bei einem mittleren Vergilbungsanteil von max. 15% als mittelstark geschädigt aus (Schadstufe 2).

b) ENZIANFILZ (VII)

Die Bestockung am Standort Enzianfilz (Paragneis) besteht überwiegend aus einem sicher autochthonen Hochlagenfichten-Altbestand mit einem durchschnittlichen Alter von 165 Jahren und jüngeren, 21-65jährigen Aufforstungsbeständen. Das Profil VII/E (Abb.2.4.) liegt in einem solchen durchschnittlich 65 Jahre alten, aufgeforsteten Bereich. Dieser Bestand hebt sich durch starke Vergilbung und viel Wipfelbrüche von allen anderen Beständen ab. Die häufigen Wipfelbrüche deuten unter anderem darauf hin, daß es sich um eine Aufforstung mit einer nicht autochthonen Herkunft handelt.

Die 20 Bäume ,die um dieses Profil VII/E zur Charakterisierung des Gesundheitszustandes beurteilt wurden,wiesen eine durchschnittliche Vergilbung von 40% auf.Im Durchschnitt ist dieser Bestandesteil stark geschädigt (Schadstufe 3).

Die Profile VII/A, B, C, D und F liegen im autochthonen Altbestand; seine mittlere Schadstufe, beruhend auf 100 eingewerteten Bäumen, errechnete sich aufgrund des Nadelverlustes mit 2 = mittelstark geschädigt. Der Anteil vergilbter Nadeln lag indessen nur zwischen 5 und 25% und somit deutlich unter jenem der standortsfremden Fichtenprovenienz.

c) RACHEL (III)

Der Standort Rachel (Paragneis) liegt im Gebiet des 1970 gegründeten Nationalparks Bayerischer Wald. Der Rachel-Südwesthang ist oberhalb 1250m ü.N.N. von einem autochthonen, über 100 Jahre alten Fichtenhochlagenwald bestockt.

Die um die Profile III/A, B, D und E (Abb. 2.3.) eingewerteten Bäume repräsentieren diesen Altbestand und weisen ihn bei einem Vergilbungsanteil der Nadeln von 10% aufgrund seiner Schlütterkeit als mittelstark geschädigt aus (Schadstufe 2). Das Profil III/C liegt innerhalb eines 60-80 jährigen, aufgeforsteten Bestandes. Die 20 bonitierten Bäume um das Profil wiesen einen Anteil an vergilbten Nadeln von 20-25% auf. Die mittlere Schadstufe lag ebenfalls bei 2 (mittelstark geschädigt).

Trotz des deutlich höheren Vergilbungsgrades der Fichten um das Profil III/C fällt dieser Bestand in die gleiche Schadstufe wie der autochthone Altbestand mit nur 10% chlorotischen Nadeln. Hierdurch wird die Unzulänglichkeit des verwendeten Verfahrens zur Schadensklassifizierung demonstriert, das primär den Nadelverlust der Bäume als Schadenskriterium bewertet. Gerade in den Hochlagen, wo die auftretenden Schäden mit Ernährungsstörungen und entsprechenden Mangelsymptomen einhergehen, ist diese Art der Schadensansprache unzureichend. Untersuchungen in Südwestdeutschland (HÜTTL 1985; Mies et al. 1983) zeigten, daß zwischen Nadelverfärbung und Nährelementgehalten deutliche Zusammenhänge bestehen, während der Parameter "Nadelverlust" offensichtlich völlig unspezifisch ist.

d) HOHER BOGEN (V)

Der Standort Hoher Bogen gehört definitionsgemäß nicht zu den typischen, durch reine Fichtenhochlagenwälder (Sodanellio-Piceetum Volk) gekennzeichneten Hochlagen des Bayerischen Waldes. Dementsprechend liegen die Profile V/A und B (Abb. 2.5.) in einem ca. 111 jährigen Altbestand, der sich aus 27% Fichte, 4% Tanne, 63% Buche und 6% Bergahorn zusammensetzt.

Nach ROLOFF (1984) wurde als Kriterium für die Vitalität der Buchen neben dem Blattverlust auch das Verzweigungssystem herangezogen. Buche und Fichte sind als gesund anzusprechen; eine Vergilbung der Fichtennadeln war im Altbestand nicht zu beobachten.

Die Profile V/C und D (Abb.2.5.) liegen dagegen in einem ca.15 jährigen Fichten-Buchen-Jungbestand. Für die Schadensklassifizierung wurden nur die Fichten herangezogen. Die Fichtennadeln weisen i.d.R. ab dem 2. Nadeljahrgang punktuelle Braunfärbungen auf, die wahrscheinlich auf Lauseinfälle zurückzuführen sind und somit als biotischer Faktor bei der Schadstufenzuordnung nicht berücksichtigt wurden. Im Gegensatz zum Altbestand trat eine z.T. recht deutliche Chlorose der Nadeln auf, die gewöhnlich bei 10% lag, aber vereinzelt auch Maximalwerte von 50% erreichte (Profil D). Die Berechnung der mittleren Schadstufe für die insgesamt 40 Bäume ergab, daß dieser Jungbestand als gesund anzusprechen ist, weil Nadelverluste fehlen und die z.T. deutliche Vergilbung im Verfahren nicht entsprechend berücksichtigt wird.

2.4.6. Bodenvegetation

Die als Subassoziation "barbilophozietosum" des Soldanello-Piceetum beschriebene Gesellschaft des Hochlagenfichtenwaldes (TRAUTMANN 1952a; OBERDORFER 1957, zit. in PETERMANN et al. 1979) wird in der Krautschicht von wenigen Arten beherrscht. Im Wesentlichen sind es Reinbestände von *Calamagrostis villosa* (Chaix) J.F.Gmel, *Vaccinium myrtillus* L., *Dechampsia flexuosa* (L.) Trin., *Luzula sylvatica* (Huds.) Gaud. und *Athyrium distentifolium* Tausch, die in dichten Horsten den Boden bedecken. Ökologisch sind diese Arten an ein Gedeihen auf und im Auflagehumus angepaßt (KÖLLING 1987 et al.).

Die Bodenvegetation um die einzelnen Profile der untersuchten Standorte ist in Vegetationslisten zusammengefaßt (Tab.A.3-5 im Anhang). Die vegetationskundlichen Aufnahmen wurden u.a. auf ihren ökologischen Zeigerwert, gekennzeichnet durch die Licht-Temperatur-, Kontinentalitäts-, Feuchte-Reaktions- und Stickstoffzahlen nach ELLENBERG (1979) ausgewertet (siehe Tab.A.3-5.). Dabei zeigte sich, daß die Aufnahmeflächen um die einzelnen Pedons eines Standortes nur geringfügig variierten. Unterschiede zwischen den typischen Hochlagenstandorten Kohlschachten, Rachel und Enzianfanz einerseits und dem auf ca. 1000 m ü.NN gelegenen Untersuchungsgebiet Hoher Bogen andererseits sind durch die geringere Meereshöhe des Amphibolit-Standortes zu erklären. Eine Abhängigkeit der Zusammensetzung der Bodenvegetation vom Bodentyp ist nicht zu erkennen.

Die Lichtzahl (L), welche die Einordnung im Gefälle der relativen Beleuchtungsstärke kennzeichnet (ELLENBERG 1979), liegt in allen 4 Untersuchungsgebieten, mit Ausnahme der Pedons V/A und V/B am Hohen Bogen bei 5 und weist somit die Bodenvegetation als Halbschattenpflanzen aus. Dieser Befund stimmt gut mit dem Charakter der für die Hochlagen typischen, licht geschlossenen Bestände überein. Um die Pedons V/A und V/B wird mit der L-Zahl 3 bzw.4 das Vorherrschen von Schattenpflanzen bzw. ein Übergang von Schattenpflanzen zu Halbschattenpflanzen angezeigt, so daß sich hier der relativ dichte Fichten-Buchen-Altbestand auf die Lichtverhältnisse am Boden auswirkt.

Die Temperatur-Zahl (T) gibt die mittleren Wärmeverhältnisse

an, unter denen die Pflanzen leben. Sie liegt für die Standorte Kohlschachten, Rachel und Enzianfilz bei 3, was die Standorte als kühl charakterisiert. Am Hohen Bogen erreicht die T-Zahl um die Pedons V/A und V/B bereits 5 und weist damit auf einen Standort mäßig wärmeliebender Pflanzen hin. Die Vegetation um die Profile V/C und V/D stellt mit der T-Zahl 3 bzw. 4 einen Übergang zu den kühleren Standorten dar. Dieses Ergebnis entspricht der geringeren Meereshöhe des Standortes Hoher Bogen gegenüber den anderen Gebieten.

Die mittlere Kontinentalitätszahl (K) vermittelt eine relative Vorstellung von den Temperaturschwankungen, denen die Pflanzen ausgesetzt sind, insbesondere von der Härte der Winter und der Häufigkeit von Früh- und Spätfrösten. Da die K-Zahl als Ergänzung zur T-Zahl gilt (ELLENBERG 1979), ist auch hier eine Unterscheidung zwischen den Standorten Kohlschachten, Rachel und Enzianfilz einerseits und Hoher Bogen andererseits möglich. Die ersten drei besitzen mit einer Kontinentalitätszahl von 4 eher subozeanische Klimaverhältnisse (vgl. Kap. 2.3.2.), während der Hohe Bogen wiederum aufgrund seiner geringeren Meereshöhe eine Zwischenposition zwischen ozeanischen (V/A und V/B) und subozeanischem (V/C und V/D) Klima einnimmt.

Mit der Feuchtezahl (F) wird das durchschnittliche ökologische Verhalten in Abhängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit bzw. dem Wasser als Lebensmedium ausgedrückt. Die mittlere F-Zahl variiert in allen vier Untersuchungsgebieten unabhängig von der Höhenlage zwischen 5 und 7; damit ist die Bodenvegetation als Frische- bis Feuchtigkeitszeiger charakterisiert. Dies steht in gutem Einklang mit den bodenkundlichen Kartierungsergebnissen (Kap. 2.4.3), die den bestimmenden Einfluß der durch hohe Niederschläge bedingten großen Sickerwassermengen in den flach-mittelgründig entwickelten Hochlagenböden belegen.

Die Reaktionszahl (R) 2 weist gemäß den niedrigen Boden-pH-Werten auf allen Standorten mit Ausnahme um die Pedons V/A und V/B am Hohen Bogen die Bodenvegetation als Starksäure- bis Säurezeiger aus. Da der pH-Wert sowohl in der Auflage als auch im Oberboden der Profile V/A und V/B sich nicht von Vergleichswerten in anderen Untersuchungsflächen unterscheidet, ist einer höheren Reaktionszahl der Bodenvegetation von 4 bzw. 3 (Säure- bis Mäßigsäurezeiger) keine Bedeutung beizumessen.

Die Stickstoffzahl (S) kennzeichnet das Vorkommen im Gefälle der Mineralstickstoffversorgung während der Vegetationszeit. Auch hier weichen die Pedons V/A und V/B mit einer S-Zahl von 6-7 (mäßig stickstoffreich bis stickstoffreich) von allen anderen Aufnahmeflächen ab. Bei jenen weist die S-Zahl (=3) der Bodenvegetation auf stickstoffarme Verhältnisse hin.

Diese Differenzierung hinsichtlich der Mineralstickstoffversorgung zwischen den Untersuchungsgebieten ist nicht plausibel, da überall ein enges C/N-Verhältnis in der organischen Auflage auf eine effiziente Mineralisation hinweist, und die Bestände aller vier Standorte außerdem laut Ausweis der Nadelanalysen gut mit Stickstoff versorgt sind (BOSCH 1986; ZIESAK 1988). Auch das allmähliche Übergehen der Auflage in den Mineralboden spricht für eine relativ gute Mineralisation in den

Hochlagen. Vermutlich wird die Aussagekraft der Stickstoff-Zahl durch Interaktionen mit dem stark sauren pH-Wert (vgl. Kap. 3.2.4.) beeinträchtigt.

Nach ELLENBERG (1979) steht der Gesamt-Stickstoff-Gehalt des Bodens nur in sehr loser Beziehung zur mittleren Stickstoff-Zahl des Pflanzenbestandes, weil er vor allem eine Funktion des Bodenalters ist und die NH_4 - und NO_3 -Produktion im Boden nur wenig beeinflusst. Deshalb eignet sich seiner Meinung nach auch das C/N-Verhältnis nur bedingt zur Beurteilung der Stickstoffernährung von Pflanzenbeständen.

3. Bodenchemische Inventur

3.1. Methoden

KORNGRÖßENANALYSE

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung für die lufttrockene Feinerde (<2mm) erfolgte mittels kombinierter Sieb- und Bürettmethode (modifiziert nach FABRIZIUS und MÜLLER 1970): Humuszerstörung mit 30% H_2O_2 ; Dispergierung durch Zusatz von 50 ml 0.1M Na-Pyrophosphat-Lösung und 6 stündiges Schütteln. Bestimmung der Kornfraktionen 0.045mm, 0.032mm, 0.016mm, 0.008mm, 0.0004mm und 0.0002mm mittels Bürettmethode; Bestimmen der Fraktionen > 0.032mm, > 0.063mm, > 0.125mm, > 0.250mm, > 0.5mm und > 1mm mittels Naßsiebung.

Zur Gewinnung der gesamten Tonfraktion für die tonmineralogischen Untersuchungen (Kap. 5.3.2.) versetzte ich nach dem Ablassen des für die Korngrößenanalyse bestimmten Anteils die restliche Suspension mit $MgCl_2$ Lösung (vgl. Kap. 5.2.1.), um die Tonminerale auszufällen.

SESQUIOXID-FRAKTIONIERUNG

-Die BESTIMMUNG des ORGANISCH GEBUNDENEN FE, AL und MN wurde nach der Na-Pyrophosphat-Methode in Anlehnung an THOMANN (1963), jedoch modifiziert nach McKEAGUE (1967), BASCOMB (1968) und BALL und BEAUMONT (1972) durchgeführt:

Schütteln von 1g lufttrockener Feinerde (<2mm) über Nacht in 50 ml Na-Pyrophosphat-Lösung ($0.1m Na_4P_2O_7 + 0.5m Na_2SO_4$) bei pH=10. Zentrifugieren des Extraktes (30 Min.) bei 4000 U/Min. Abdekantieren der Lösung über Blaubandfilter.

-Aus diesem Extrakt bestimmten wir auch den NA-PYROPHOSPHATLÖSLICHEN KOHLENSTOFF (Cp), der nach HIGASHI et al. (1981) dem gesamten extrahierbaren Kohlenstoffgehalt des Bodens entspricht.

Hierfür wurden 20 ml des obigen Extraktes in 50ml -Kolben pipettiert und mit 8ml konz. H_2SO_4 versetzt. Nach 10 Minuten pipettiert man unter Kühlung 5ml 2N Kaliumdichromatlösung zu und erhitzt das Oxidationsgemisch 90 Min. bei 120°C, wobei alle 20 Minuten aufgeschüttelt wird. Nach Beendigung der Oxidation füllten wir den Kolben mit aqua dest. bis zur Marke.

Die Analyse der Cp-Konzentration des Extraktes erfolgte am Spektralphotometer 550SE (Perkin-Elmer) bei einer Wellenlänge von 584 nm und durch Errechnen nach der Formel $c = 26.4 \cdot \text{Extinktionswert}$ (SCHRAMM 1986).

-EXTRAKTION der AMORPHEN FE-,AL- und MN-OXIDE und- HYDROXIDE mit oxal-saurem NH_4 -Oxalat nach TAMM (1932),modifiziert nach SCHWERTMANN(1964) bei pH=3.25,Raumtemperatur,Dunkelheit und 1 Stunde Schüttelzeit.

-EXTRAKTION DER GESAMTEN PEDOGENEN FE-,AL-und MN-OXIDE und HYDROXIDE mittels Gemisch aus Na-Dithionit und Na-Citrat bei pH=7.3 und 80°C nach MEHRA und JACKSON (1960):2g lufttrockene Feinerde (<2mm)werden 2*15 Min. unter Rühren extrahiert und zum Schluß mit 0.05 M MgSO_4 -Lösung nachgewaschen. Die vereinigten Extrakte ergänzt man mit aqua dest. auf 100ml.

Die Elementbestimmung für Fe,Al und Mn in den verschiedenen Fraktionen erfolgte mit Hilfe von Eichstandards in Extraktionslösung am AAS (Perkin Elmer Modell 380) .

pH-WERT

Potentiometrische Bestimmung des pH-Wertes am METHROM-Gerät (Herisau E512) mit Glaselektrode in aqua dest. und 0.01m CaCl_2 -Lösung. Verhältnis Mineralboden: Lösung=1:2.5 ;für Auflage-Horizonte und humusreiche A-Horizonte 1:5.

GESAMTKOHLNSTOFF -und STICKSTOFF

Die GESAMTKOHLNSTOFF-Bestimmung erfolgte für die Pedons der Standorte Kohlschachten (II),Rachel(III) und Hoher Bogen (V) an gemahlernen Proben durch thermische und katalytische Oxidation zu CO_2 am CARMOMAT-Wösthoff.Die Bodenproben des Standortes Enzianfilz(VII) wurden gasanalytisch an einer CHN-O-Rapid-HERAEUS-Apparatur analysiert.

Der GESAMT-STICKSTOFF der Pedons vom Kohlschachten,Rachel und Hohen Bogen bestimmte man an gemahlernen Proben modifiziert nach KJELDAHL: Aufschluß mit 6ml Salicyl-Schwefelsäure,1 g Thiosulfat und 6ml Aufschlußsäure (1g Selen+1l konz. H_2SO_4)im Aufschlußblock BÜCHI 430. Destillation im BÜCHI-Stickstoff-System 325/345 mit 30% NaOH in eine Vorlage von 10 ml 2% H_3BO_3 .Titration mit 0.05 n HCL.

Für den Standort Enzianfilz erfolgte die N-Bestimmung zusammen mit der Kohlenstoff-Analyse gasanalytisch an der CHN-O-Rapid-HERAEUS-Apparatur.

GESAMTAUF SCHLUß mit HF-HClO_4

Bestimmung der Gesamtgehalte an Haupt-und Spurenelementen durch HF-

HClO₄-AUFSCHLUß bei 250°C in FUTRONE -Aufschlußgestell: Einwaage von gemahlener, trockener (105°) Probe in Teflontiegel; Abrauchen mit 1 ml HClO₄ und 10 ml HF. Aufnahme der Trockene mit 10 ml 10M HCl-Lösung und quantitatives Überführen der Lösung mit aqua dest. in 100ml Meßkolben. Humusreiche Horizonte wurden vor dem Aufschluß 1 Stunde bei 490° C ge-
glüht.

ELEMENTBESTIMMUNG:

Bestimmung von K und Na mittels Emissionsflammenphotometrie gegen Eich-
lösung an Eppendorf-Gerät. K mit Propan-Luft-Flamme, Na mit Acetylen-
Luft-Flamme.

Messung (Atomabsorption) von Fe, Mn, Cu und Zn gegen Eichkurven mit AAS
380 (Perkin-Elmer) in oxidierender Acetylen-Luft-Flamme; ebenso Ca und
Mg nach Zugabe von 1.5%-SrCl₂-Lösung. Messung (Absorption) von Al in
Lachgas-Acetylen-Flamme am gleichen Gerät.

Die Phosphor-Bestimmung erfolgte kolorimetrisch als reduzierter blauer
Vanadat-Komplex; Messung im Spektralphotometer 550SE (Perkin-Elmer) bei
830 nm.

SCHWERMETALL-GESAMTBESTIMMUNGEN

Für das Untersuchungsgebiet Enzianfilz wurden vom Bayerischen Geolo-
gischen Landesamt, Abteilung Bodenkunde, Bestimmungen der Gesamtgehal-
te von Schwermetallen in der Feinerde (<2mm) durchgeführt und für
diese Studie zur Verfügung gestellt.

Methodik: Gesamtaufschluß des gemahlenden Bodens mit einem Gemisch aus
conc. Fluß-, Perchlor- und Salpetersäure in Teflontiegeln. Aufnahme des
Abdampfrückstandes in Salpetersäure. Bestimmung der Elemente mit einem
Atom-Absorption-Spektralphotometer (AAS) des Typs PU 9000 von Philips;
Cu, Ni, Co, Zn und Pb wurden mit einer Luft-Acetylen-Flamme analysiert,
Cr mit einer Lachgas-Acetylen-Flamme. Die Cd-Gehalte wurden mit der
Graphitrohr-AAS mit elektrothermischer Aufheizung ermittelt.

KATIONEN-AUSTAUSCHKAPAZITÄT

Die effektive Kationen-Austauschkapazität bestimmten wir in Anlehnung
an ULRICH (1966) bzw. TRÜBY et al. (1984):

Einwaage von 2.5g trockenem (65°C) Feinboden (<2mm) bzw. 1.25g Aufla-
ge. Zugabe von 100 ml 0.5 N NH₄Cl-Lösung. Boden-Lösungsgemisch von Hand
kräftig aufschütteln, anschließend 2 Std. auf einer Schüttelmaschine
hin und her bewegt. Die Lösungen bleiben über Nacht stehen und werden

am nächsten Morgen nochmals 30 Min. horizontal geschüttelt. Anschließend Filtration über Vakuumpumpe und Membranfilter (DE 67, Ø 50mm). Das Filtrat wird in 100 ml PE-Flaschen aufgefangen, der Vorlauf (ca. 3ml) allerdings verworfen.

Die Bestimmung des ausgetauschten Fe, Ca, Mg, und Al (gesamt) erfolgt am AAS. Bei der Ca- und Mg-Bestimmung wird zur Kompensation von Störungen durch Al-Ionen 1.5% SrCl_2 -Lösung zugesetzt.

Die K- und Na-Messungen führten wir mittels Emissionsflammenphotometrie am Eppendorf-Gerät durch.

Al^{3+} und Protonen werden mit 0.05 N NaOH bis zum Wendepunkt titriert, der für Al^{3+} bei $\text{pH}=5.6$ und für H^+ bei $\text{pH}=4.2$ liegt. Die Endpunktindikation erfolgt potentiometrisch mit dem METROHM-Titroprozessor E 602.

Im humosen Oberboden fanden wir bei der Bestimmung des Al durch AAS i.d.R. höhere Werte als bei der potentiometrischen Titration. Dieser Befund beruht wohl zum Teil darauf, daß am AAS, im Gegensatz zur Titration, auch stabile Al-Komplexe miterfaßt werden (mdl. Mittlg. Dr. SCHIERL).

Nach SÜSSER (unveröff.) tritt die Fehlmenge zwischen AAS-Al und titriertem Al dann auf, wenn man das Al nur bis zum Wendepunkt des Al-Pufferbereichs in der Titrationskurve erfaßt; denn die Lage der Wendepunkte hängt nicht allein vom Al selbst ab, sondern auch von der Art des nächstfolgenden Puffers. Bei insgesamt hohen Al-Gehalten der hier untersuchten Bodenproben bleibt der Fehlbetrag jedoch meist gering.

Für die Berechnung der Austauschigenschaften der Hochlagenböden wurden die Gehalte des durch Titration bestimmten Al^{3+} verwendet.

-BERECHNUNG: $\text{mmolIIÄ}/100\text{g} = (\text{cxV})/\text{Einwaage} \times \text{Äquivalentmasse}$

c =Kationen-Konzentration in der Extraktionslösung (mg/l)
 V =Volumen der Extraktionslösung (ml); dabei wurde von 100ml ausgegangen.

3.2. Ergebnisse der Laboruntersuchungen

3.2.1. Korngrößenverteilung

In den Pedons aus Granit und Gneis (Kohlschachten, Rachel, Enzianfilz) dominiert in der Basis- und in der Hauptfolge die Sandfraktion (Abb. 3.1. und 3.2.). Auf dem Amphibolit-Standort (Hoher Bogen) hingegen erreichen die Sand- und die Schluff-Fractionen bei insgesamt deutlich höheren Tongehalten (Abb. 3.2) etwa gleiche Anteile, bedingt durch die kleineren Korngrößen der Primärminerale im Ausgangsgestein.

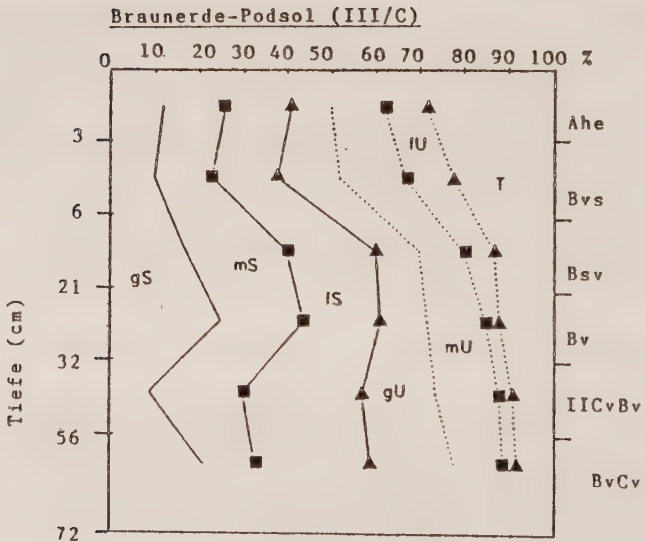
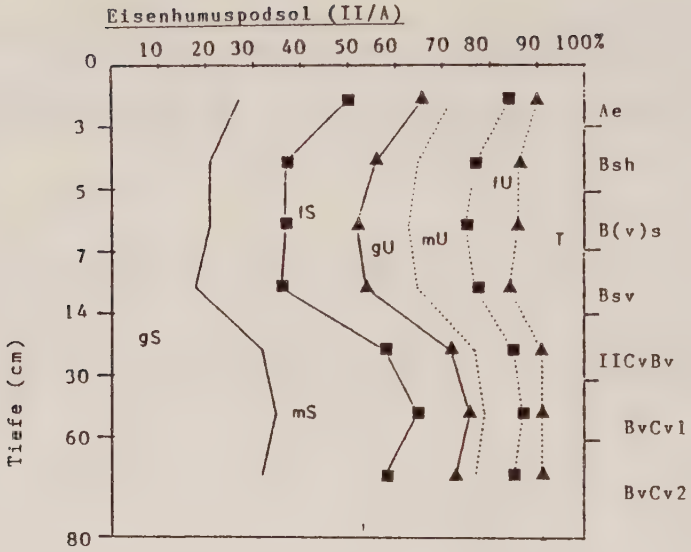


Abb.3.1.; Körnung der mineralischen Feinerde zweier repräsentativer Pedons aus Granit (II) und Paragneis (III), Angaben in Gewichts-%.

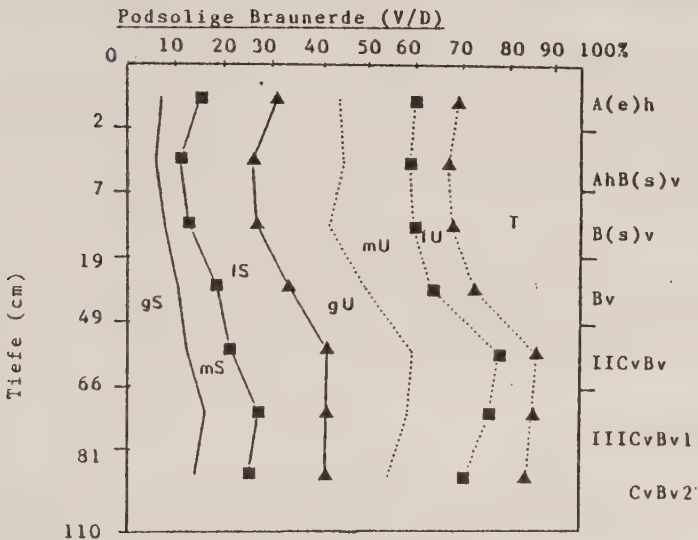
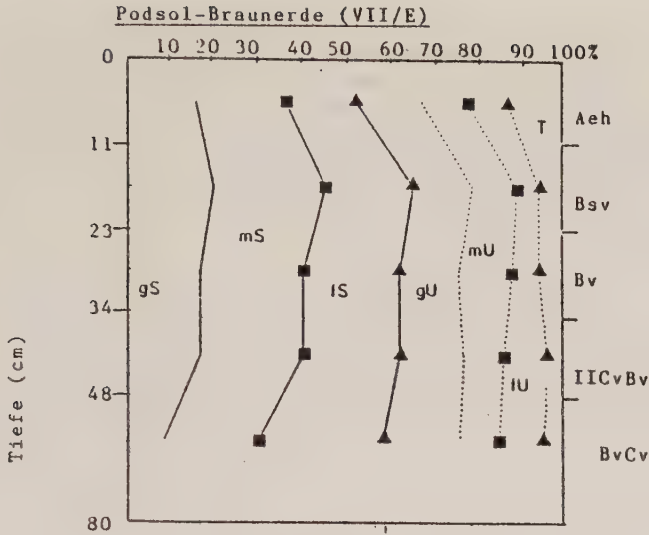


Abb.3.2.: Körnung der mineralischen Feinerde zweier repräsentativer Pedons aus Paragneis (VII) und Amphibolit (V). Angaben in Gewichts-%.

Aus den Analysendaten der Feinerde resultiert als Bodenart für die Podsole aus Granit und Gneis lehmiger Sand, für die Braunerden dagegen in der Hauptfolge sandiger Lehm und in der Basisfolge schluffiger Sand.

Auf dem feinkörnigen Amphibolit variiert die Bodenart der Braunerden in der Hauptfolge zwischen sandigem Lehm und schluffigem bzw. tonigem Lehm; in der Basisfolge liegt schluffig-sandiger Lehm vor (Tab.A.6-A.9.).

Der regelmäßige Zunahme der Tongehalte in den Horizonten der Hauptfolge (Abb.3.1. und 3.2.) kann sowohl auf der starken kryoturbaten Beanspruchung während des Periglazialklimas als auch auf fortgeschrittener Verlehmung durch die holozäne Bodenbildung beruhen. Eine Abnahme des Grobsand- und Feinsandanteiles, gekoppelt mit gleichzeitigem Anstieg der Grobschluff- und Mittelschluff-Fraktion zeigt nach ARNAUD und WHITESIDE (1963) den Einfluß kryoklastischer Verwitterung an; diese Verschiebung ist jedoch nur für wenige der untersuchten Pedons zu bestätigen. Auch die höheren Grobschluff- und häufig auch höheren Feinsand-Gehalte, die STAHR (1979) in Böden des Schwarzwaldes in der Hauptfolge entdeckte und weniger auf Kryoklastik als auf Lößeinwehung (Lokallöß) zurückführte, finden sich nur in wenigen der von mir untersuchten Profile (II/A; III/A; V/B und C; VII/B und D). Demnach zeichnet sich die Hauptfolge in den Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes im Vergleich zur Basisfolge durch höhere Tongehalte, v.a. bedingt durch die holozäne Bodenbildung (Verlehmung) aus.

Eine relativ geringe kryoturbate Beanspruchung des Materials innerhalb der Hauptfolge kann eventuell mit der flachen Hangneigung in den Hochlagen erklärt werden. Die Hauptfolge der hier untersuchten Böden hebt sich nicht wie in anderen Mittelgebirgen (SCHILLING und WIEFEL 1962; SEMMEL 1964; STAHR 1979; FRIED 1984) durch einen deutlich höheren Anteil an Lößkomponenten von der Basisfolge ab.

Bei einer Gegenüberstellung von Körnung und Podsolierungsgrad zeigt sich eine klare Beziehung zwischen beiden Größen. Die Podsolierungssintensität nimmt i.d.R. mit dem Anteil der Grobfractionen deutlich zu.

Die in Tab.A.6.-A.9. im Anhang angeführten Skelettgehalte der einzelnen Pedons wurden abgeschätzt, da die Entnahme von Volumenproben in den stark steinigern Hochlagenböden nicht möglich war. Dementsprechend können auch keine Vorratsberechnungen durchgeführt werden.

3.2.2. Sesquioxiddynamik

Aus der Verteilung pedogener Oxide des Fe, Al und Mn (Sesquioxide) läßt sich die Richtung und der Umfang pedogenetischer Prozesse ableiten (BLUME et al. 1969). Somit kann der Entwicklungszustand von Braunerden, Parabraunerden, Podsolon und Gleyen gut durch ihre Sesquioxiddynamik

beschrieben werden; dies gilt auch, wenn sich verschiedene profilprägende Prozesse (z.B. Podsolierung und Vergleyung) überlagern bzw. maskieren.

Substrat der Bodenbildung ist in den Hochlagen des Bayerischen Waldes eine i.d.R. flachgründige, locker gelagerte Hauptfolge über einer verfestigten, geschichtet-plattigen, schwer wasserdurchlässigen Basisfolge (Kap. 2.4.1.). Zusammen mit den hohen Niederschlägen (ca. 1800 mm/a) und den hohen Abflußwerten (1400 mm/a; BAUBERGER 1977) hauptsächlich in der Hauptfolge hat diese Schichtung des Ausgangssubstrates Konsequenzen für Bodenwasserhaushalt und Pedogenese. Neben vertikalen Stoffumlagerungen durch Podsolierungsprozesse ist verstärkt lateraler Stofftransport mit (temporärem) Hangzugwasser zu erwarten.

Am Beispiel einer Reliefsequenz am Standort Enzianfilz (VII) auf Paragneis (charakteristisch für Standorte auf saurem Ausgangsgestein; Abb. 3.3., 3.4. und 3.6. oben) und einiger repräsentativer Profile der Standorte Rachel (Abb. 3.5.; stark Hangzugwasser-beeinflußt) und Hoher Bogen (Abb. 3.6. unten; basisches Muttergestein) werden das Ausmaß und die Art der Verlagerungsvorgänge in den Hochlagenböden diskutiert.

EISEN-VERLAGERUNG

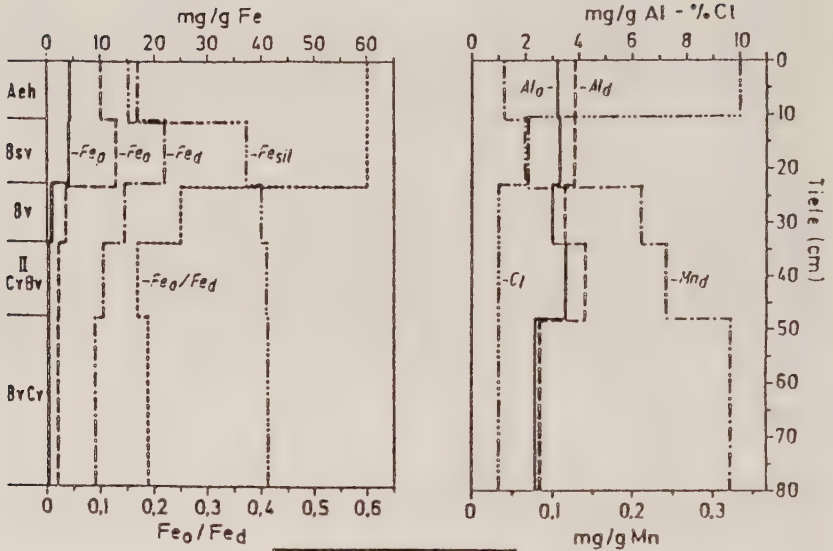
Dithionit- und oxalatlösliches Eisen spiegeln wichtige pedogenetische Prozesse wieder. Aus diesem Grunde erfordert eine Differenzierung in verschiedene Bodenformen Kenntnisse über Art und Ausmaß der Fe-Verlagerung (BLUME et al. 1966).

Die chemische Verwitterung durch Hydrolyse und Säureangriff setzt aus Silikaten Fe-, Al- und Mn-Ionen frei, die je nach Boden-pH-Wert als Hydroxide ausgefällt oder als Ionen, als Oxihydroxid-Sole oder als Chelate verlagert werden. Da Fe erst ab einem pH 3 ionar in Lösung geht, kommt einer Erhöhung der Löslichkeit der Fe(III)-Oxide bei den vorliegenden, höheren Boden-pH-Werten (Kap. 3.2.3.) durch reduzierende Bedingungen bzw. durch einen hohen Gehalt an organischen Verbindungen in der Bodenlösung große Bedeutung zu.

Die Fe-Verlagerung als profilprägender Faktor der Podsolierung wurde in den verschiedenen Pedons anhand der Gehalte an dithionitlöslichem Fe_d (= Summe des pedogenen Fe) quantifiziert, obwohl die damit ebenfalls erfaßte Fraktion des komplexierten Fe (Fe_p) nicht an der Färbung durch amorphe und kristalline Fe-Oxide- und Hydroxide in den illuvialhorizonten beteiligt ist.

Die PODSOL-BRAUNERDE VII/E (Abb. 3.3.) zeigt innerhalb der Bodencatena am Standort Enzianfilz die geringste Podsolierung. Die Gehalte an pedogenem Fe steigen vom Aeh in den B-Horizont um knapp 30%. Wie schon in Kap. 2.4.4. beschrieben, liegt bei einer Fe-Wanderung von mehr als 30% bereits ein Podsol vor. Daß dieses Profil in seiner bodentypologischen Zuordnung an der Grenze zwischen Braunerden und Podsolen liegt, zeigt sich auch anhand der großen Ähnlichkeit zum Pedon VII/D, einem

Podsol - Braunerde (VII/E)



Braunerde-Podsol (VII/D)

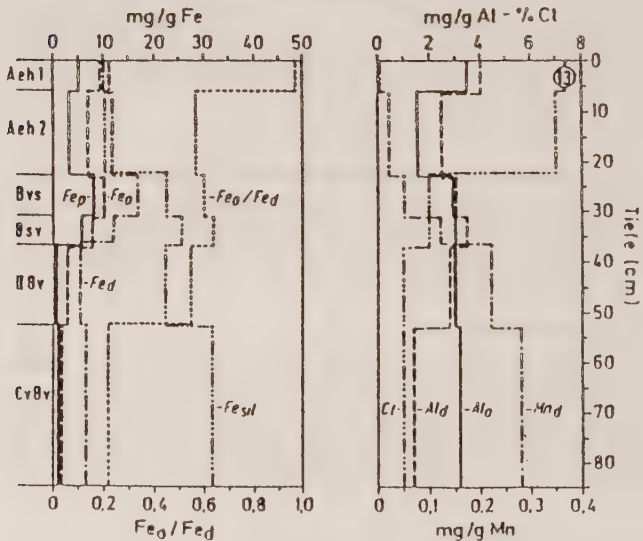


Abb.3.3.: Fraktionen der Sesquioxide in einer Podsol-Braunerde und einem Braunerde-Podsol aus Paragneis. Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe).

Braunerde-Podsol, bei dem jedoch die Fe_0 -Gehalte vom A zum B-Horizont um 73% steigen. Neben der Sesquioxiddynamik spricht aber auch das für Braunerden typische Maximum des Aktivitätskoeffizienten (Fe_0/Fe_d) im Oberboden (Blume et al. 1966) für die Zuordnung des Pedons VII/E zum Subtyp Podsol-Braunerde.

Der Anteil des silikatisch gebundenen Fe übertrifft in diesem Pedon bereits im Bsv-Horizont jenen des pedogenen Fe, so daß hier ein insgesamt nur mäßiger Verwitterungs- bzw. Verbraunungsgrad vorliegt.

Profil VII/D gehört bereits in die Gruppe der BRAUNERDE-PODSOLE; es liegt im Gelände oberhalb der Podsol-Braunerde (Abb.2.4.). Bei diesem Subtyp steigen die Gehalte an pedogenem Fe vom Aeh in den Bvs-Horizont um mehr als 30% bis maximal 100% (vgl.Kap.2.4.4.). Am Profil äußert sich die stärkere Podsolierung in einem deutlich graustichigen Eluvialbereich über einem klar erkennbaren, rotbraunen Anreicherungs-horizont.

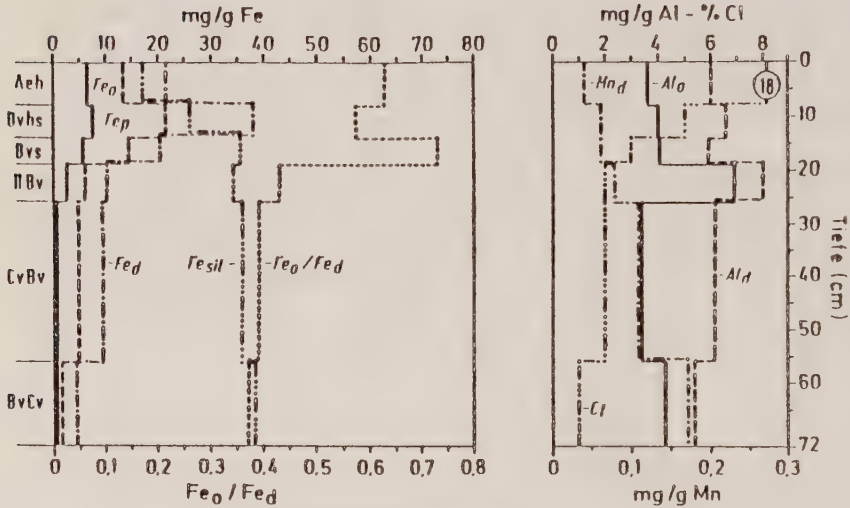
Die Verwitterung ist in diesem Profil gemäß der stärkeren Podsolierung bereits etwas weiter fortgeschritten, so daß erst in 23 cm Tiefe das silikatische Fe den pedogenen Fe-Gehalt übersteigt.

Nur 10 Höhenmeter von Profil VII/D entfernt befindet sich am Standort Enzianfilz (Abb.2.4.) ein Pedon mit ungewöhnlich hohen Humusgehalten (30%) im A-Horizont, ohne daß die Umgebung auf anmoorige Verhältnisse hinweisen würde. Hier handelt es sich um einen MASKIERTEN BRAUNERDE-PODSOL, dessen Verarmungshorizont durch starke Humusakkumulation überprägt und verdeckt ist. Eine ähnliche Podsol-Ausbildung wurde von MUELLER (1983) im Oberengadin auf Silikatgestein gefunden und als alpiner Braunpodsol bezeichnet. Die Verlagerung des Fe in Form metallorganischer Komplexe dürfte hier ein besonders großes Ausmaß erreichen. (Abb.3.4.). Das Maximum des Fe-Aktivitätskoeffizienten liegt, allerdings trotz im Vergleich zum Bvhs niedrigem C_1 -Gehalt, im Bvs.

Auch im Eisenhumuspodsol (VII/B) des Plateaus am Enzianfilz erreicht das Fe_0/Fe_d -Verhältnis sein Maximum nicht im Bsh-, sondern im darunterliegenden Bhs-Horizont (Abb.3.4.). Ein höherer Anteil oxalat-löslichen Eisens an den pedogenen Oxiden unterhalb des Bh-Horizontes erklärt sich nach Farmer et al. (1982) durch eine erneute Mobilisierung von Fe im Bh. Diese wird durch zeitweise Wassersättigung zusammen mit der Akkumulation von organischem Material induziert. Unter diesen reduzierenden Bedingungen kommt es zu erneuter Mobilisierung, Verlagerung und Umfällung des Fe.

DUCHAUFOR (1977, zit.bei FARMER et al.1983) fand in den Bh-Horizonten von Humus-Eisen-Podsolen einen höheren Anteil von Humin-gegenüber Fulvosäuren im Gegensatz zum darunterliegenden Bs. Zu ähnlichen Ergebnissen kam WIECHMANN (1978) an norddeutschen Podsolen. Die aus dem Bh-Horizont nach unten wandernden Fulvosäuren werden an der Oberfläche bereits vorhandener Sesquioxide im Bs adsorbiert, wie DAWSON et al. (1978) an subalpinen Podsolen nachweisen konnte. Durch die Adsorption organischer Stoffe an der Oberfläche der Sesquioxide wird deren Auskristallisation gehemmt bzw. vermindert (SCHEFFER 1966; KWONG et al. 1979).

Braunerde-Podsol (maskiert) (VII/C)



Eisenhumuspodsol (VII/B)

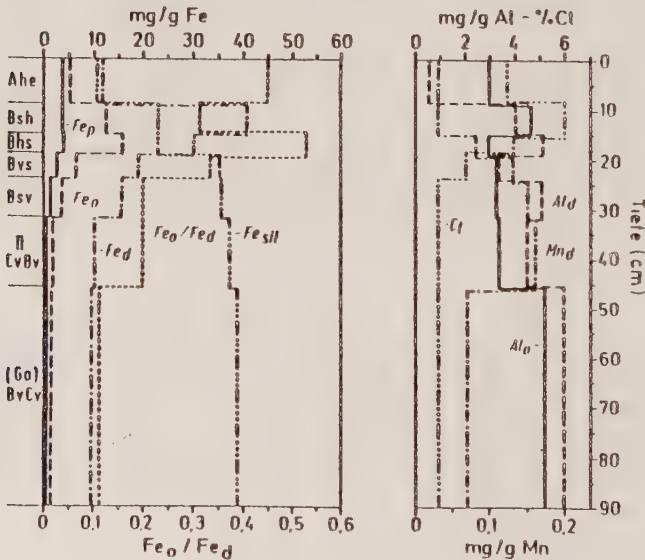


Abb.3.4.: Fraktionen der Sesquioxide in einem Braunerde-Podsol (maskiert) und einem Eisenhumuspodsol aus Paragneis. Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausproben Fe₀).

Die Fe_p -Gehalte der hier untersuchten Eisenhumuspodsole sind im Eluvial- wie im Illuvialbereich gleich niedrig (Abb.3.4.); dieser Befund deutet möglicherweise auf einen hohen Anteil der Verlagerung von Fe in Form von Solen hin. Zum anderen können die Chelatoren längst mineralisiert und Fe als Oxid wieder ausgefällt sein. Ein deutlicher Anstieg des Corg-Gehaltes im Bsh-Horizont ist vermutlich auf Humuseinspülung zurückzuführen.

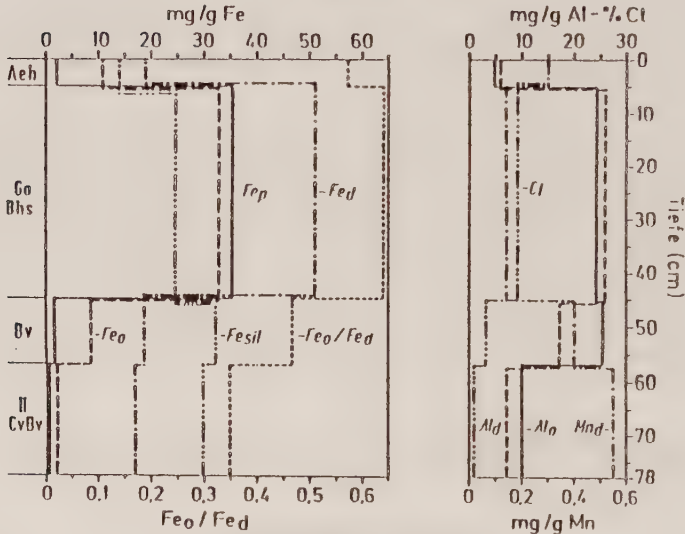
Dort, wo sich auf großflächigen Verebnungen infolge des behinderten Abflusses Hochmoore (Filze) bildeten, entwickelten sich im Übergangsbereich zwischen Filz und Hochlagenpodsolon GLEY-PODSOLE (VII/A, Abb. 3.5.oben). Eine Rohhumusaufgabe von 20-25 cm Mächtigkeit forciert die Podsoldynamik. Unter ihr folgt ein Aeh-Horizont, der mit 17% Humus den für die Hochlagen typischen, humusreichen A-Horizonten entspricht. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Bodentypen dürfte im Gley-Podsol (VII/A) Fe aus dem A-in den B-Horizont in besonders großem Maße in Form von metallorganischen Komplexen verlagert worden sein. Im dunkelgrüngrauen Br-Horizont erreicht das organisch gebundene Fe ein zweites Maximum und macht ca. 50% des gesamten pedogenen Fe aus. Dieses Maximum im Unterboden spricht auch für eine laterale Zufuhr durch langsam ziehendes, an Fulvosäuren angereichertes Hang-Grundwasser (Abb.3.6.oben).

Die Zunahme des Gesamteisen ($Fe_{sil} + Fe_d$) in der Basisfolge bei den meisten Pedons läßt auf eine absolute Fe-Verarmung in der Hauptfolge schließen, wobei das gelöste Fe vermutlich überwiegend lateral abtransportiert wurde.

Typisch für den stark vom Hangzugwasser beeinflussten Standort Rachel (Abb.2.3.) sind die HANGGLEY-PODSOLE (III/A und E, Abb.3.5.). Im Pedon III/E steht einem ca. 5 cm dicken Eluvialbereich ein 45 cm mächtiger Anreicherungs-horizont (GcBhs) gegenüber. Diese ausgeprägte Akkumulation vor allem an organisch komplexiertem Fe (Fe_p) kann nur durch eine laterale Zufuhr erklärt werden. Das hierfür verantwortliche Hangzugwasser stammt aus der oberhalb anschließenden, humusreichen Blockhalde des Großen Rachelgipfels. Das reichlich anfallende Sickerwasser perkoliert rasch durch die mit Humus aufgefüllten Hohlräume des Blockfeldes und läßt sich dabei mit löslichen organischen Stoffen auf. Diese haben vermutlich Säurecharakter, wirken z.T. als Reduktoren und mobilisieren oxidisch und silikatisch gebundenes Fe der Mineralbodenhorizonte unter der Blockhalde. Deshalb liegen bis zu 70% des vorhandenen pedogenen Fe im GcBhs-Horizont in komplexierter Form (Fe_p) vor (Abb.3.5.).

Weniger stark von diesem temporären Hangzugwasser beeinflusst ist der im Gelände von den zugehörigen Block-Humus-Böden weiter entfernt liegende HANGGLEY-PODSOL III/A (Abb.3.5.). Eine diffuse Fleckung im braun-grauen SwGcAhe und die leicht erhöhten Fe_p -Gehalte bei abnehmendem C_l -Anteil deuten noch auf einen Hangzugwasser-Einfluß hin. Eine gewisse Pseudogley-Dynamik wird durch die fahle Farbe dieses Horizontes und das Auftreten von Rostflecken auch im Innern der Aggregate angezeigt.

Hanggley-Podsol (III/E)



Hanggley-Podsol (III/A)

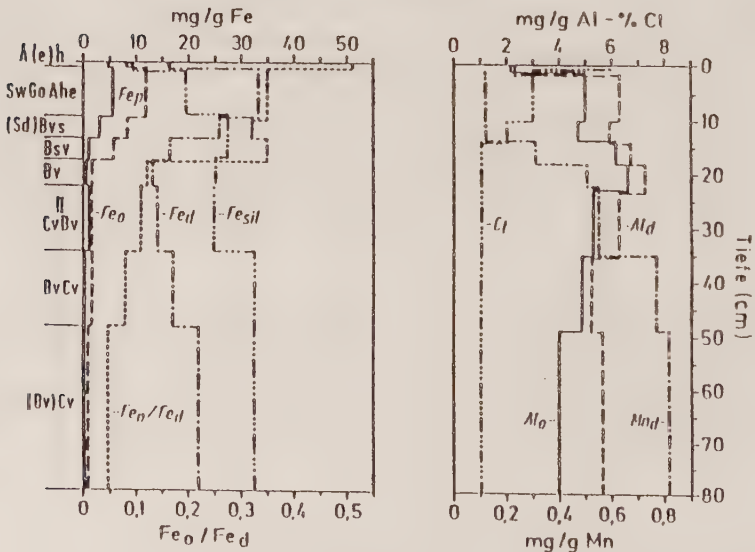


Abb.3.5.: Fraktionen der Sesquioxide in Hanggley-Podsolen aus Paragneis. Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_p).

Als Beispiel für sehr gering podsoliierte Böden wird das Pedon V/D am Standort Hoher Bogen diskutiert. In dieser PODSOLIGEN BRAUNERDE fand nur eine äußerst schwache, vertikale Fe-Verlagerung (ca. 2%) statt (Abb.3.6.unten). Das Fe liegt noch zum überwiegenden Teil in silikatischer Bindung vor. In die Horizonte der Basisfolge ist das intensiv verwitterte Material eines fossilen, tertiären Rotlehms (Oxisol) eingearbeitet, was durch die hohen Fe_2 -Anteile belegt wird.

Die nur schwache Podsolierung bei gleichzeitigem Rückgang der Fe_{sil} - Gehalte des Oberbodens trotz sogar etwas niedrigeren pH-Werten im Gegensatz zu Pedons aus saurem Ausgangsgestein (vgl. Abb.3.9.) beruht zum einen auf der klimatisch bedingten, günstigeren Humusform (Moder). Andererseits wird die Perkolations des Sickerwassers durch den höheren Tongehalt (30%) im Oberboden behindert. Schließlich übertreffen gesteinsbedingt auch die Gehalte an pedogenen Fe-Oxiden bei weitem die Vergleichswerte der Pedons aus Granit und Paragneis; hohe Fe-Oxid-Gehalte behindern die Podsolierung.

ALUMINIUM-VERLAGERUNG

Die Aluminium-Verteilung wird ebenfalls stark von den Prozessen der Bodenbildung beeinflusst, ohne daß jedoch die Färbung der Horizonte davon betroffen ist. Durch den weitgehenden Einbau des bei der Silikat-Verwitterung freiwerdenden Al in die Zwischenschichten der Tonminerale ist der Anteil des freien pedogenen Al im Vergleich zu den Gehalten an pedogenen $Fe(III)$ -Oxiden und -Hydroxiden gewöhnlich sehr gering.

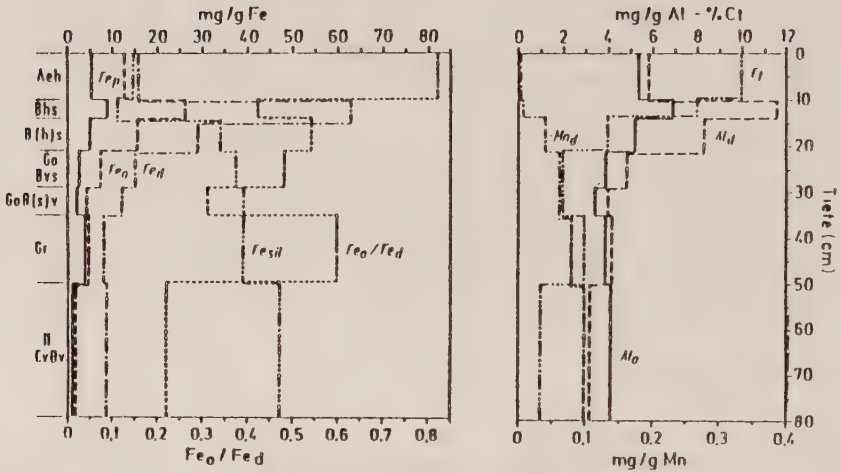
Al-Oxide und -Hydroxide gehen bereits ab einem pH-Wert < 4.8 in Lösung. Al-Komplex-Sole weisen aufgrund geringerer acidoider Eigenschaften bei gleichem Humusanteil einen höheren isoelektrischen pH-Wert auf als Fe-Komplex-Sole. Dadurch wird Al schon bei höherem pH vor Fe mobilisiert und im Pedon tiefer verlagert.

In der PODSOL-BRAUNERDE VII/E am Standort Enzianfilz liegt eine schwache Al-Verlagerung vor. Al_d erreicht ein Maximum im obersten Abschnitt der Basisfolge. Der höhere oxalatlösliche Al-Anteil im Vergleich zum Al_d -Gehalt, wie er in diesem Pedon im Unterboden auftritt, ist bei den niedrigen Humusgehalten in der Basisfolge nicht zu erklären.

Im BRAUNERDE-PODSOL VII/D ist keine Al-Verlagerung in tiefere Horizonte nachzuweisen. Ca. 80% des nicht silikatisch gebundenen, freien Al liegen in organisch komplexierter Form (Al_p) im Aeh-Horizont vor (Tab.A.12). Aus dem Vergleich der Pedons VII/E und VII/D wird deutlich, daß die Al-Verlagerung im Pedon sich nicht eindeutig bodentypabhängig quantifizieren läßt, wie es für Fe der Fall ist.

Im Gegensatz zum Braunerde-Podsol der Pedonsequenz am Enzianfilz liegt im MASKIERTEN BRAUNERDE-PODSOL wieder eine deutliche Al-Verlagerung mit einer Anreicherung in der Basisfolge (II Bv) vor.

Gley - Podsol (VII/A)



Podsolige Braunerde (V/D)

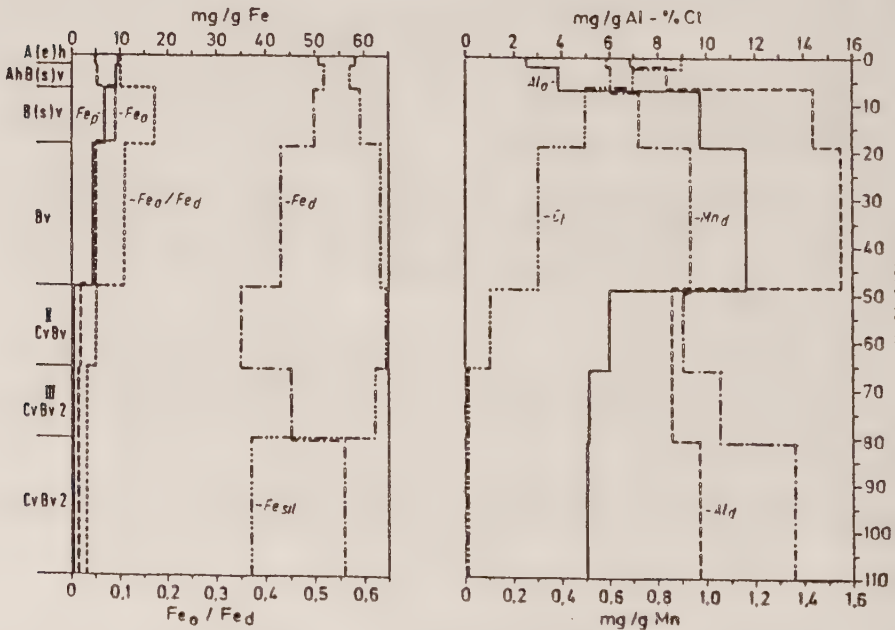


Abb.3.6.: Fraktionen der Sesquioxide in einem Gley-Podsol aus Paragneis (VII/A) und in einer podsoligen Braunerde aus Amphibolit (V/D). Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_0).

Im Bsh-Horizont des EISENHUMUSPODSOLS VII/B (Abb.3.4.) übertrifft das oxalatlösliche Al wiederum das dithionitlösliche. NG KEE KHONG et al. 1979 beobachteten an podsolierten Böden das gleiche Phänomen, ohne eine Erklärung dafür geben zu können.

Im Eisenhumuspodsol und in dessen Hauptfolge erreicht das pedogene Al maximale Gehalte im Bhs- und im By-Horizont. FARMER et al. (1980) und ANDERSON et al. (1982) sehen einen löslichen Al-Silikat-Komplex als die dominierende mobile Form an, in der Al in Bs-Horizonte transportiert wird. Dort fällt dieser Komplex als Imogilit und/oder Allophan aus, was mittels Oxalat-Extraktion der Tonfraktion nachgewiesen wurde. Mit diesen Ergebnissen stellen diese Wissenschaftler die Vorstellung von organischen Fe- und Al-Komplexen als wichtigster Transportform von Podsolon (REHFUESS 1981; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984) in Frage. Da ich im Rahmen meiner bodenkundlichen Studien nur die Sesquioxid-Fraktion untersucht und nicht jene Prozesse, die zu einer Verlagerung von Fe, Al und Mn in den Pedons führen, kann bzgl. der Verlagerungsmechanismen in den Hochlagenböden keine Entscheidung getroffen werden.

In den von mir durchgeführten tonmineralogischen Untersuchungen fand ich keine amorphen Tonminerale in Form von Allophan oder Imogilit. Dies kann jedoch darauf beruhen, daß zum Nachweis dieser Tonminerale ein oxalatsaurer Extrakt des Tons notwendig ist (vgl. FARMER et al. 1983; STAHR 1984). Meines Erachtens sprechen die insgesamt hohen Anteile an oxalatlöslichem Al in den Illuvialhorizonten durchaus für das Vorhandensein von Allophan und Imogilit.

Jene Profile hingegen, die neben der vertikalen Verlagerung im Zuge der Podsolierung auch eine laterale Zufuhr an Fe, Al und Mn mit dem Hangwasser erführen (z.B. III/A und E am Standort Rachel) besitzen in den Anreicherungs-horizonten neben einem hohen Gehalt an pedogenem Fe auch viel pedogenes Al. So sind im HANGGLEY-PODSOL (III/E) 75% des pedogenen Al komplexiert (Al_p ; vgl. Tab. A.11.). Auch hier kann der insgesamt hohe Anteil an pedogenem Al nur durch seitlichen Transport erklärt werden.

Im Profil III/A zeigt sich ein etwas stärkerer Einfluß der vertikalen Stoffverlagerung daran, daß das Al_d -Maximum unter dem Fe_d -Maximum liegt (Abb.3.5.; BLUME et al. 1966).

Am Standort Hoher Bogen ist Al ebenfalls viel mobiler als Fe, was nach BLUME et al. (1966) für podsolierte und Podsol-Braunerden typisch ist (Abb.3.6.unten).

Die Zunahme der kristallisierten Al-Oxide (Al_d - Al_o) ist in der mit tertiärem Paläoboden vermischter Basisfolge geringer als der Anstieg der kristallinen Fe(III)-Oxide (Fe_d - Fe_o). Bei intensiver Verwitterung unter tropischem, tertiärem Klima reichern sich bei rascher Auswaschung der Alkali- und Erdalkalitionen sowie Kieselsäure vorwiegend Fe-Oxide und Kaolinit an (Oxisol). Insgesamt übertrifft die vermutlich holozäne Al-Verlagerung auf Amphibolit jene der Böden aus saurem Ausgangsgestein. Dieser Befund mag eventuell mit den etwas niedrigeren pH-Werten im Oberboden zusammenhängen.

MN-VERLAGERUNG

Die Löslichkeit der Mn-Oxide steigt mit sinkendem pH-Wert. Im Vergleich zu Fe(III)-Oxiden sind Mn-Oxide leichter reduzierbar. Damit ist nicht nur eine erhöhte Pflanzenverfügbarkeit, sondern auch eine stärkere vertikale bzw. laterale Verlagerung verbunden (WIECHMANN 1978).

Abgesehen vom Standort Hoher Bogen lagen die Gehalte des Na-Pyrophosphatlöslichen- und oxalatlöslichen Mn unter der Nachweisgrenze von 20 ppm. In den stark podsoliierten Böden VII/A,B am Enzianfilz liegt das Maximum des pedogenen Mn bereits unterhalb des Solums, während es in den weniger stark podsoliierten Pedons VII/C,D und E noch in der Basisfolge anzutreffen ist (Abb. 3.3., 3.4. und 3.6.).

In den stark vom temporärem Hangzugwasser beeinflussten Bodenformen des Standortes Rachel (III/A und E) scheinen die Tiefenfunktionen des Mn im Gegensatz zur Fe- und Al-Verteilung stärker durch Vertikaltransport geprägt zu sein.

Auf dem ultrabasischen Gestein am Hohen Bogen liegen die Mn-Gesamtgehalte deutlich über den Vergleichswerten für Böden aus saurem Ausgangsmaterial (Abb. 3.11.). Deshalb sind auch die Anteile an Mn überlegen. Die starke Zunahme des pedogenen Mn in der Basisfolge ist auf die Einspülung aus der Haupt- in die Basisfolge zurückzuführen.

Die Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes sind u.a. in der Hauptfolge durch hohe Humusgehalte gekennzeichnet, so daß im Profilschnitt die Eluvialhorizonte unabhängig vom Podsolierungsgrad oft nur schwach ausgebildet sind. Typische Ae-Horizonte treten selten auf. Demgegenüber sind die dunkelrot-rostbraunen Illuvialhorizonte deutlich erkennbar. Die evidenten Unterschiede in der Verlagerung des pedogenen Fe führte zum Vorschlag neuer Abgrenzungskriterien zwischen den vorgelagerten Bodenformen. Die Sesquioxide von Al und Mn eignen sich hierfür nicht, da sie in diesen sauren Böden i.d.R. bereits tief in die Basisfolge verlagert wurden.

3.2.3. Humuskörper, C_i -, N_i - und P_i -Gehalte

Die C/N- und C/P-Verhältnisse im Auflagehumus der Hochlagenböden sind niedriger als man für derartig extreme Standorte erwarten würde. Nach der Klassifikation von ZEISCHWITZ (1980) wären die Humusformen in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes aufgrund der relativ engen C/N(19-26) und C/P(177-538)-Relationen (Abb.3.7.) den feinhumusreichen bis feinhumusarmen Moder-Formen zuzuordnen. Diese Charakterisierung trifft jedoch nach meinen Geländebeobachtungen nur für den Standort Hoher Bogen zu. Auf den Granit- und Gneisstandorten hingegen liegt unserer Meinung nach ein feinhumusreicher, lockerer und biologisch aktiver Rohhumus vor. Für die biologische Aktivität spricht neben den engen Bioclementrelationen auch der allmähliche Übergang des Oh-Horizontes in den Mineralboden.

Der Auflagehumus der Hochlagenböden ist mächtig (auf den untersuchten Standorten 5 bis 11 cm) und besteht zu etwa 50% aus einem homogenen, dunklen, meist lockeren Oh-Horizont. Der Übergang zum Mineralboden ist, wie bereits erwähnt, durch Einspülen von Humuspartikeln stets diffus, und der oberste Mineralbodenhorizont ist als Aeh bzw. Ahe immer stark humos ausgebildet.

Die N-Gesamtgehalte in der Auflage mit 16-22mg/g entsprechen früheren Ergebnissen (DBG 1975). Sie gehen parallel zu den Gehalten an organischem C mit zunehmender Profiltiefe zurück. Die engen C/N-Verhältnisse der Auflagerhorizonte (Abb.3.7.) sprechen für eine intensive Stickstoffmineralisation. Der Wiederanstieg des C/N-Verhältnisses in der Basisfolge einzelner Pedons (Tab.A.14.-A.17.) hängt vermutlich mit dem Eindringen von fulvosäurereichem Sickerwasser (vgl.Kap.2.4.1.) zusammen.

In den typischen Hochlagenpodsolon kommt es zu einer Verlagerung der P-Verbindungen aus dem Ae in den Bsh-Horizont, wo sie zum Großteil als Fe/Al- oder organische Phosphate gefällt und teilweise okkludiert werden. In den weniger stark podsolierten Braunerde-Podsolon, Podsol-Braunerden und podsoligen Braunerden geht der P-Gesamtgehalt parallel zu den mit der Profiltiefe abnehmenden Kohlenstoff-Gehalten zurück. Bei starker Festlegung von Phosphor in schwerlöslichen Al- und Fe-Verbindungen, wie sie für die untersuchten Böden anzunehmen ist, muß mit einer maßgeblichen Mitwirkung der Mykorrhizapilze bei der Aufnahme von Phosphat gerechnet werden. Die vermutete Schädigung der Mykorrhiza durch phytotoxische, monomere Al-Ionen in der Bodenlösung (ULRICH et al.1979;ULRICH et al.1983) müßte sich daher vor allem in einer verschlechterten Phosphorversorgung äußern. Die P-Ernährung der Bestände ist jedoch nach den nadelanalytischen Untersuchungen von ZIESAK(1988) am Standort Hoher Bogen(Amphibolit) und auch am Standort Kohlischachten(Granit) gut. Auch andere Bestände der Hochlagen sind, gemessen an den Nadelspiegelwerten (BOSCH et al.1983;BOSCH 1986) und dem relativ engen C/P-Verhältnis(177-538) in der organischen Auflage gut mit P ernährt.

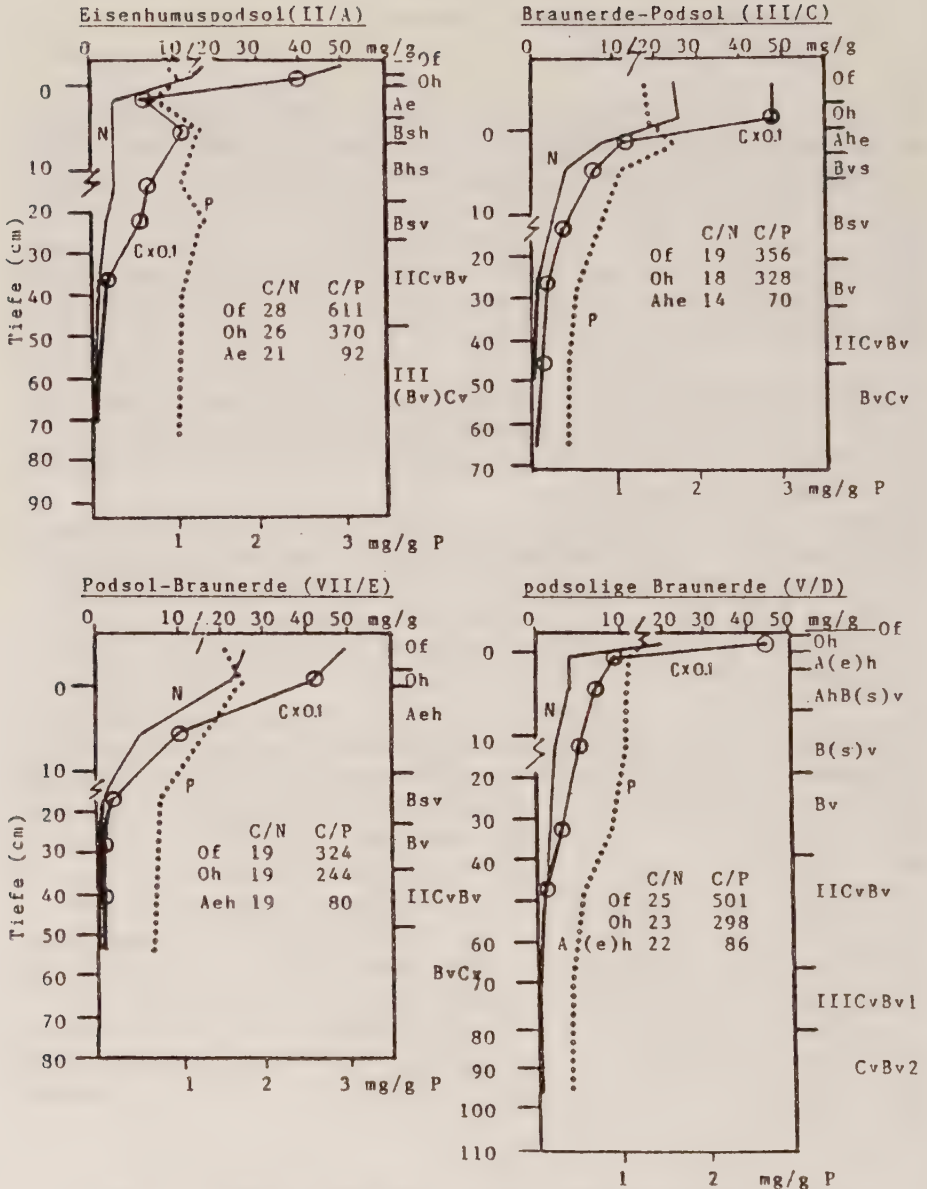


Abb.3.7.: Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphor-Gesamtgehalte in Pedons aus Granit(II), Paragneis(III, VII) und Amphibolit (V).

Der Ca-Sättigungsgrad in der Auflage (=Anteil des Ca an der Ionenäquivalentsumme aus Ca, Al und Fe, wobei die Wertigkeit für Al und Fe mit 3 angenommen wird, Tab.3.1.) zeigt nur für einzelne Oh-Horizonte der Gneis- Pedons (Rachel, Enzianfilz) Werte < 0.05, die nach MEIWES et al. (1984) für eine starke Gefährdung der Feinwurzeln durch Säuretoxizität sprechen (vgl. KÖLLING 1988). Die Böden aus Granit und Amphibolit besitzen im Oh höhere Ca-Sättigungen. Die Überlegene Ca-(und Mg-) Sättigung an den Austauscherflächen der Auflagerhorizonte am Hohen Bogen (Tab.3.8. und Abb.3.12.) sind mit den geringfügig höheren Gehalten an austauschbarem Ca (und Mg) im Mineralboden zu erklären. Über die Basenpumpwirkung der Vegetation entsteht eine basenreichere Streu. Ca ist aufgrund seiner hohen Adsorptionsstärke und der Möglichkeit zur Komplexbildung relativ fest an die organischen Stoffe gebunden, so daß es der Auswaschung und Verdrängung durch konkurrierende Al -und Fe-Ionen bei anhaltender Zufuhr über die Streu besser widerstehen kann. Ausnahmen bilden hier die Of-Horizonte der Pedons III/E und VII/B aus Gneis (Tab.3.1.) deren hoher Ca-Sättigungsgrad keiner Erhöhung der i.d.R. sehr niedrigen Gehalte an austauschbarem Ca gegenübersteht.

Was die Berechnung des Ca-Sättigungsgrades betrifft, so wies NÄTSCHER (unveröff.) nach, daß Fe im NH_4Cl_2 -Extrakt als Fe(II) vorliegt und wahrscheinlich komplexiert ist. Berücksichtigt man dies bei der Berechnung des Ca-Sättigungsgrades, so fallen dessen Werte noch günstiger aus.

$\frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{3+}} \quad \frac{\text{mmol l}^{-1}}{\text{mmol l}^{-1}}$			
Kohlschachten (II)	Rachel (III)	Enzianfilz (VII)	Hoher Bogen (V)
II/A: Of-0.59 Oh-0.06	III/A: Of-0.26 Oh-0.11	VII/A: Of-0.42 Oh-0.19	V/A: Of-0.72 Oh-0.52
II/B: Of-0.69 Oh-0.51	III/B: Of-0.02 Oh-0.03	VII/B: Of-0.60 Oh-0.29	V/B: Of-0.81 Oh-0.69
II/C: Of-0.68 Oh-0.38	III/C: Of-0.05 Oh-0.02	VII/C: Of-0.06 Oh-0.04	V/C: Of-0.91 Oh-0.80
	III/D: Of-0.14 Oh-0.04	VII/D: Of-0.19 Oh-0.10	V/D: Of-0.82 Oh-0.52
	III/E: Of-0.61 Oh-0.14	VII/E: Of-0.08 Oh-0.06	

Tab.3.1.:Ca-Sättigungsgrad (nach MEIWES et al. 1984) in den Auflagerhorizonten der Pedons aus Granit (II), Gneis (III und VII) und Amphibolit (V).

Im Vergleich zu Untersuchungsgebieten im Schwarzwald im Granit (KEILEN 1978) und Buntsandstein (ALDINGER 1987) als auch zu Phyllitstandorten (FRANCKE-CAMPANA 1986) in der Oberpfalz liegt die Basensättigung (VX; Austausch-Ca, -Mg, -K/KAK eff.; Tab.3.6.) im Auflagehumus der von mir untersuchten Hochlagenböden nur in den Gneisgebieten niedrig. Die V(%) -Werte schwanken am Rachel und Enzianfilz i.d.R. zwischen 6 und 20%, während sie am Kohlschächter (Granit) zwischen 24 und 45% liegen. Am Hohen Bogen erreicht die Basensättigung in den Auflagehorizonten z.T. sogar Werte über 50%. Anzeichen für eine beschleunigte Basenauswaschung aus der organischen Auflage beschränken sich somit auf die primär Ca -und Mg -armen Gneisstandorte, wo anscheinend mehr Al als in Böden aus Granit und Amphibolit in den biogenen Kreislauf mit einbezogen ist und an der Verdrängung des Ca aus der Auflage mitwirkt.

3.2.4. pH-Wert

Die pH-Werte in der organischen Auflage und in den Mineralbodenhorizonten sind in allen Gebieten recht ähnlich. In den Auflagen liegen die pH(H₂O)-Werte i.d.R. unter 4. Ausnahmen stellen die Pedons am Standort Rachel dar, wo der pH(H₂O) zwischen 4.0 und 4.9 variiert. Dies ist wahrscheinlich auf die noch zu Beginn des 20. Jahrh. durchgeführte Beweidung im Bereich der Rachelwiese (Abb.2.3.) zurückzuführen (SEYFERT 1975).

In den Mineralbodenhorizonten der durchwurzelten und von pedogenetischen Prozessen beeinflussten Hauptfolge liegen die in H₂O gemessenen pH-Werte zwischen 4.2 und 5.1; jene in CaCl₂ zwischen 3.2 und 4.4 (Abb.3.8.).

Diese Spanne entspricht früheren Untersuchungen (DBG 1975). In der Basisfolge steigen die pH(H₂O)-Werte unabhängig vom Ausgangsgestein auf Werte über 4.8; die in CaCl₂-Lösung gemessenen Werte liegen auch hier um durchschnittlich 0.5-0.8 pH-Einheiten unter jenen in H₂O. Der weite Abstand zwischen pH(H₂O) und pH(Salz) deutet darauf hin, daß die Böden sich zum Zeitpunkt der Untersuchungen nicht in einem Versauerungsschub befanden (vgl. ULRICH et al. 1984).

Gesamtaziditäts- und pH-Messungen seit Ende der 30er Jahre im Erzgebirge (FIEDLER und HOFMANN 1985) ergaben, daß schon vor dem weltweiten starken Anstieg der SO₂ und NO_x-Emission Ende der 50er Jahre die Böden aus saurem Ausgangsgestein (Granit, Granitporphyr usw.) sowohl in der Auflage als auch in den oberen 50 cm des Mineralbodens pH-Werte aufwiesen, die jenen der hier untersuchten Hochlagenböden entsprechen. Die Tiefe der sauren Zone sowie die zum damaligen Zeitpunkt geringe Immissionsbelastung schließen kurzfristige immissionsbedingte Prozesse als Ursache für Versauerung und Entbasung in den Böden des Erzgebirges (außer am Südfall) aus. Entsprechend wird auch in der hier vorliegenden Studie angenommen, daß es bereits während und unmittelbar nach der Entstehung der peri-

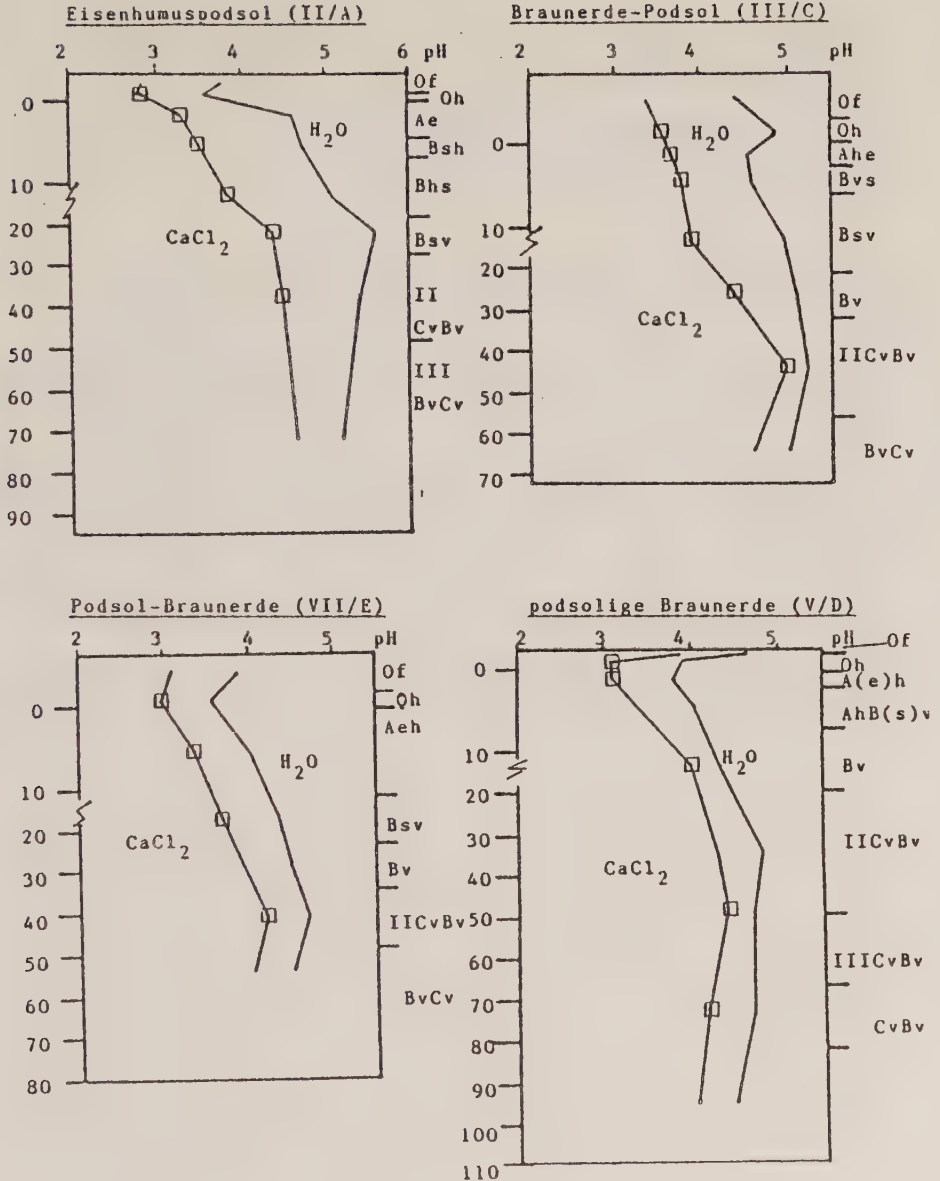


Abb.3.8.: pH(H₂O)- und CaCl₂-Werte repräsentativer Pedons aus Granit (II), Paragneis (III und VII) und Amphibolit (V).

glazialen Schuttdecken zu einer kräftigen Entbasung kam, wofür FIEDLER und HOFMANN die kalten, kohlesäurereichen Schmelzwässer verantwortlich machen.

Für das Untersuchungsgebiet Hoher Bogen kann aus dem hohen Gehalt an Fe-Oxiden und Kaolinit in der Basisfolge auf eine intensive Verwitterung während des Tertiärs geschlossen werden, die für die Basenarmut der periglazialen Deckschichten verantwortlich sein dürfte.

Der Protonendruck allein über den H^+ -Input von $1.5-2 \text{ kmol} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ in den Hochlagen des Bayerischen Waldes (vgl. Kap. 2.4.1.) entspricht annähernd jenen Pufferraten, die FÖLSTER (1985) für Böden aus (quarz-armen) silikatreichen, metamorphen oder magmatischen Gesteinen angibt. Trotzdem weisen zum einen die hohe Al-Sättigung der Austauscherspositionen (Kap. 3.2.6.), als auch eine Verlagerung oxalatlöslicher, reaktiver Al-Hydroxo-Verbindungen, die für eine schnelle Protonenpufferung in sauren Böden verantwortlich sind (HARTIKAINEN 1986), auf einen bereits abgesenkten Versauerungswiderstand im Oberboden hin.

Sind die reaktiven Al-Hydroxo-Verbindungen in den Oberbodenhorizonten einmal verbraucht, so nimmt nach SÜSSER (1987) der entsprechende Horizont sehr schnell den pH-Wert der perkolierenden Lösung an; die Austauscher bleiben Al-gesättigt, und die Pufferreaktionen beschränken sich dann vermutlich auf die deutlich langsamere Silikatverwitterung. Die hohe Al-Sättigung der Austauscherpositionen im Mineralboden von >80% deutet darauf hin, daß die Rate der Silikatverwitterung hinter dem Protoneneintrag zurückbleibt. Vermutlich sind die Pufferreaktionen durch Silikatverwitterung wegen der langsamen Reaktionskinetik so stark eingeschränkt, daß die Böden in den Hochlagen des Bayerischen Waldes trotz ihres Silikatreichtums und der darin begründeten hohen potentiellen Pufferkapazität tiefgründig versauern.

Bemerkenswert sind die niedrigeren $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ -Werte von 3.6-4.1 in den A-Horizonten der Amphibolit-Pedons im Vergleich zu den Bodenformen aus saurem Ausgangsgestein. Auch hier beträgt die Al-Sättigung >80% und die reaktiven, oxalatlöslichen Al-Hydroxo-Verbindungen erfuhren bereits eine intensive Auflösung bzw. Verlagerung aus dem A- in die B-Horizonte, wobei diese Auswaschung am Hohen Bogen im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten am höchsten ist (vgl. Abb. 3.6. unten). Geht man davon aus, daß höhere Kationengehalte der Silikate, wie sie die Ergebnisse der Gesamtaufschlüsse zeigen (Abb. 3.11.) und das Vorliegen kleinerer Korngrößen (vgl. Kap. 3.2.1. und Abb. 3.2.) eine im Vergleich zu Graniten und Paragneisen höhere Verwitterungsrate bedingen (CRONAN 1985), so überrascht der niedrige pH-Wert der Böden auf Amphibolit. Die Dominanz des Kaolinit in der Tonfraktion von Haupt- und Basisfolge auf diesem Standort deutet jedoch darauf hin, daß bereits während der intensiven Verwitterung im Tertiär eine starke Freisetzung und Abfuhr von Alkali- und Erdalkali-Ionen sowie Kieselsäure aus leicht verwitterbaren Silikaten ablief. Demnach wird vermutlich der bodenchemische Zustand dieser Pedons zu Beginn der

holozänen Bodenentwicklung nicht erheblich von jenen der Böden aus saurem Muttergestein ab. Nur so kann der für Böden auf ultrabasischem Gestein äußerst geringe Versauerungswiderstand erklärt werden, und nur so ist der Widerspruch zu Untersuchungsergebnissen für Basaltstandorte des Fichtelgebirges bei gleicher Protonen-Input-Situation aufzulösen (vgl. SÜSSER 1987). Dort liegen die pH-Werte im Oberboden deutlich über 4 und die Austauscher sind noch weitgehend mit Ca und Mg gesättigt, weil die Böden wegen fehlender tertiärer Verwitterung noch hohe Gehalte an feinkörnigen, leicht verwitternden Ca- und Mg-Silikaten führen.

3.2.5. Gesamtgehalte weiterer Bioelemente

Entsprechend den verschiedenartigen Ausgangsgesteinen in den Untersuchungsgebieten differieren die Gesamtgehalte einiger Bioelemente deutlich zwischen den einzelnen Standorten. Die Ca-, Mg-, K-, Na-, Fe-, Al- und Mn-Gehalte sowie die Cu- und Zn-Gehalte der eigenen Bestimmung (mit Flammen-AAS und Eppendorf) werden für die Untersuchungsgebiete Kohlschachten, Rachel und Hoher Bogen im folgenden diskutiert. Die Ergebnisse der vom Geologischen Landesamt durchgeführten, umfassenden Schwermetalluntersuchungen am Standort Enzianfilz sind in einem gesonderten Kapitel (Kap. 3.2.7.) besprochen.

KOHLSCHACHTEN (Granit)

Im Untersuchungsgebiet Kohlschachten finden sich in den Böden z.T. hohe Ca- und Mg-Gesamtgehalte, welche ebenso wie die Na- und K-Gehalte unabhängig vom Podsolierungsgrad von Pedon zu Pedon variieren (Tab. 3.2. und Abb. 3.9.). Diese Variation läßt sich nur mit einer inhomogenen, mineralogischen Zusammensetzung des periglaziär verlagerten und in die periglazialen Schuttdecken eingearbeiteten Granitgruses erklären. Die Körnung des Granitskeletts in den Böden deutet darauf hin, daß das Ausgangsgestein teils feinkörnige, teils porphyrische Struktur aufweist. Damit verbunden sind Schwankungen in den Glimmer- und Alkali-/Erdalkali-Feldspatgehalten. So entwickelte sich der Podsol II/A in primär kalifeldspatreicherem, die Pedons II/B und C in plagioklas- und biotitreicherem Material.

Na, K, Ca und Mg steigen gemäß der nachlassenden Verwitterungsintensität mit zunehmender Profiltiefe an. Die relative Verwitterungsbeständigkeit des Muskovits und Orthoklas, in denen der Hauptanteil des K gebunden ist, zeigt sich in hohen oder sogar überlegenen K-Gesamtgehalten der A- im Vergleich zu den B-Horizonten.

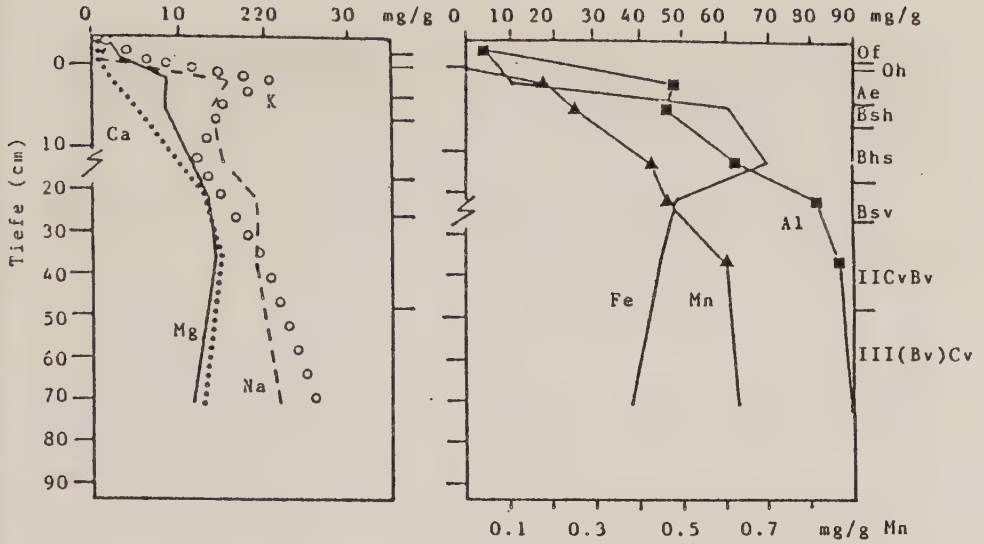
Obwohl das Na sehr leicht auswaschbar ist, kommt es im Oberboden zu keinem deutlichen Absinken der Na-Gehalte (die Menge nimmt sicher während der Verwitterung ab). Auch liegt die Na-Sättigung der

Standort: Kohl-schachten (Granit)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mg _t mg/g	Fe _t	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t
Eisen- Humus- Podsol (II/A)	Of	6 - 4.5	3.25	2.70	1.20	1.6	0.78	0.49	4.36	-	-	6.48	-	0.096
	Oh	4.5- 0	3.93	3.00	3.35	8.15	0.99	0.94	10.45	-	-	25.15	-	0.025
	Ae	- 3	4.46	3.51	10.20	31.55	3.62	2.14	13.24	0.216	0.216	52.59	-	0.017
	Bsh	- 5	4.61	3.59	12.15	30.00	4.31	5.45	42.84	0.337	0.337	57.83	-	0.040
	B(v)s	- 7	4.78	3.82	12.85	29.95	5.82	9.42	48.65	0.521	0.521	72.85	-	0.075
	Bsv	-14	4.93	4.01	14.20	31.90	6.13	9.41	40.40	0.566	0.566	77.31	0.018	0.078
	IICvBv	-30	4.40	4.40	13.65	31.25	6.08	9.72	39.18	0.685	0.685	90.81	0.016	0.111
	BvCvI	-60	5.16	4.54	12.90	32.00	5.51	9.02	36.23	0.629	0.629	91.87	0.024	0.097
	BvCv2	-82	5.27	4.63	11.25	26.90	4.59	8.25	36.42	0.466	0.466	76.97	0.024	0.084
Braunerde- Podsol (II/B)	Of	5 - 2.5	3.90	3.09	6.25	6.10	7.12	5.86	8.87	0.293	0.293	25.64	0.018	0.104
	Oh	2.5- 0	3.81	2.84	2.10	1.65	0.36	0.38	8.95	-	-	19.69	0.019	0.050
	Aeh	- 3	4.31	3.50	14.00	14.95	9.50	6.03	17.87	0.312	0.312	50.33	-	0.044
	Ahe	- 9	4.71	3.91	14.00	14.30	10.26	5.67	43.84	0.491	0.491	56.08	-	0.043
	Bvs	-15	5.05	4.17	14.25	13.45	9.67	10.65	49.66	0.530	0.530	70.12	-	0.080
	Bsv	-20	4.92	4.26	17.80	15.30	12.39	14.57	77.15	0.578	0.578	85.13	-	0.109
	CvBv	-35	4.81	4.50	19.60	18.00	16.25	20.32	51.96	0.759	0.759	95.05	-	0.125
	IIBvCv	-65	5.07	4.61	24.50	20.45	21.57	24.62	51.93	0.972	0.972	108.30	-	0.132
	IICv	-85	5.12	4.70	24.70	22.00	22.04	23.39	60.91	0.994	0.994	107.59	-	0.126
Eisen- Humus- Podsol (II/C)	Of	3 - 0	3.74	2.86	1.60	1.70	1.78	0.54	4.18	-	-	5.01	-	0.088
	Oh	1 - 0	3.56	2.80	1.25	5.95	3.01	0.54	7.07	-	-	21.69	-	0.067
	Ahe	- 4	4.61	3.30	15.45	20.15	8.64	2.24	11.01	0.186	0.186	49.17	-	0.046
	Bsh	- 7	4.70	3.50	13.45	14.60	8.44	5.06	60.52	0.250	0.250	46.43	-	0.051
	Bhs	-18	5.10	3.87	15.10	12.10	11.62	11.69	69.07	0.434	0.434	63.47	-	0.083
	Osv	-27	5.62	4.40	19.15	15.10	13.39	13.04	48.87	0.474	0.474	82.12	-	0.102
	IICvBv	-48	5.39	4.50	19.15	19.65	14.37	15.24	44.67	0.598	0.598	87.53	-	0.121
	III(Bv)Cv	-94	5.20	4.64	21.85	26.20	12.15	12.89	39.32	0.627	0.627	94.01	-	0.119

Tab.3.2.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde der Pedons am Standort Kohl-schachten.

Eisenhumuspodsol (II/A)



Braunerde-Podsol (III/C)

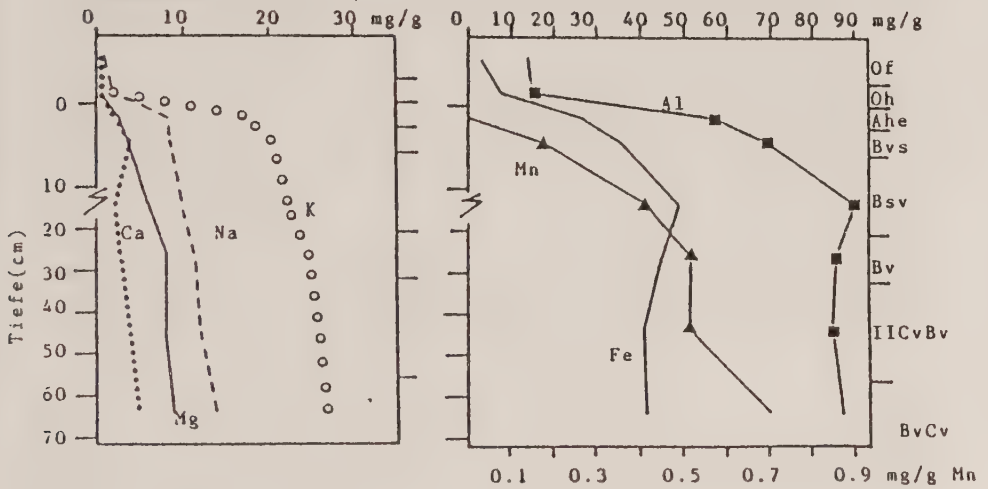


Abb.3.9.: Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde repräsentativer Pedons aus Granit (II) und Paragneis (III).

Austauscher sehr hoch (Kap.3.2.6.). Anscheinend ist der Albitanteil unter den Plagioklassen des Kohlschächtergranits hoch, so daß die Mobilität durch einen hohen Vorrat an silikatischem Na kompensiert wird. Zudem besitzen die Na-reichen Plagioklasse eine größere Verwitterungsstabilität als anorthitreiche Feldspäte (Kap.5.).

Über die Basenpumpwirkung der Vegetation wird die organische Auflage der plagioklasreicheren Pedons II/B und C deutlich mit Ca und Mg angereichert.

Nadelanalysen von 1/2-jährigen und 3 1/2-jährigen Fichtennadeln von Probestämmen aus der Umgebung des Pedons II/C ergaben Mg-Gehalte, die mit max. 0.64 mg/g deutlich unter dem Grenzwert einer ausreichenden Mg-Versorgung (0.7-0.8 mg/g) lagen. Ebenso war eine ausgeprägte Verlagerung von Mg aus den älteren Nadeln (0.48 mg/g) in die jüngeren (0.64 mg/g) zu erkennen (ZIESAK 1988). Die Schadensklassifizierung der 20 um das Pedon II/C eingewerteten Bäume ergab jedoch nur eine durchschnittliche Vergilbung von 5%.

Die Tiefenfunktion der Fe-, Al- und Mn-Gesamtgehalte entsprechen der genetischen Stellung der Pedons. Fe hat sein Maximum in den Bs-Horizonten, während Al und vor allem Mn aufgrund ihrer höheren Mobilität bereits tiefer verlagert wurden.

Die Cu-Gesamtgehalte der eigenen Bestimmung mit AAS (Flamme) lagen häufig unterhalb der Nachweisgrenze von 15 ppm und mit <15ppm von allen Untersuchungsgebieten am niedrigsten. In Graniten sind Biotit und Chalkopyrit die wichtigsten Kupferlieferanten.

Die Zinkernährung von Fichten in den Hochlagen des Bayerischen Waldes weicht zwischen "gesunden" und "kranken" Fichten häufig voneinander ab. Erkrankte Fichten sind knapper versorgt als gesunde. Am Kohlschächten lagen die Zinkgehalte in 1/2-jährigen und 3 1/2-jährigen Fichtennadeln mit 31 bzw. 43 ppm deutlich oberhalb des Grenzwertes von ca. 25 ppm (ZIESAK 1988; HÜTTL 1986). Die Zink-Gesamtgehalte lagen im durchwurzelten Solum deutlich unter 80 ppm. ZÖTTL und MIES (1983b) konnten in Fichtenbeständen eine relativ enge Beziehung zwischen dem Zinkgehalt der Nadeln kranker und gesunder Fichten und dem Zink-Gesamtgehalt der Feinerde in 20-30 cm Tiefe herstellen. Dabei korrelierte der Grenzwert von 25ppm Zn in den Nadeln kranker Fichten mit einem Zinkgehalt der Feinerde von ~85 ppm. Gemäß diesem Befund müßten die Fichten am Kohlschächten eine Zink-Unterversorgung aufweisen, was nicht der Fall ist. Die erwähnte Korrelation gilt folglich nicht für die Standorte in den Hochlagen des Bayerischen Waldes.

Geochemisch ist Zn mit Fe und Mg vergesellschaftet. Es ersetzt Fe und Mg in bestimmten Positionen der Silikate und Oxide. In Graniten ist der bedeutendste Zn-Lieferant der Biotit (WEDEPOHL 1953, zit. in KEILEN 1978). Dementsprechend haben helle Granite meist niedrigere Zn-Gehalte als dunkle. Das bei der Verwitterung freiwerdende Zn wird an Tonmineralen, Eisenoxiden und organischen Stoffen adsorbiert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984). Die starke Fixierung des Zn in relativ stabilen und wenig beweglichen, organischen Zn-Komplexen erklären die im Ver-

gleich zu den obersten Mineralbodenhorizonten hohen Zn-Gehalte in der organischen Auflage. Diese Erhöhung der Zn-Gehalte in der Auflage ist teilweise auf biogene Akkumulation, z.T. aber auch wohl auf Immissionsbelastung zurückzuführen. Nach RUPPERT (1987) ist in Waldpedons in humusreichen Horizonten ein zivilisatorischer Anstieg von 22 ppm Zn über das natürliche Ausmaß hinaus zu erwarten. Für Cu beträgt diese Zunahme ca. 8 ppm.

Mit nachlassender Verwitterungsintensität in größerer Profiltiefe nehmen die Biotit- und somit auch die Zn-Gehalte der Feinerde zu. Eine pedogene Anreicherung in den Illuvialhorizonten der Eisenhumuspodsole ist aus den Analysedaten nicht ersichtlich.

RACHEL (Paragneis)

Für das Untersuchungsgebiet am RACHEL liegen mineralogische Daten über die Zusammensetzung des Ausgangsgesteins vor (BROCKAMP 1968, zit. in BAUBERGER 1977). Demnach handelt es sich um einen Gneistyp mit hohen Quarz-, Kalifeldspat- und Biotitanteilen und einem geringen Plagioklas- und Muskovitgehalt. Dies spiegelt sich auch in den Ca-, Mg-, Na- und Gesamtgehalten der Feinerde wieder, die deutlich hinter den K-Gehalten zurückbleiben (Tab. 3.3. und Abb. 3.9.). I. d. R. steigen die Gehalte dieser Elemente mit zunehmender Profiltiefe und sinkender Verwitterungsintensität an. Ausnahmen von dieser Regel zeigen sich in den Mg- und Ca-Gesamtgehalten der vom Hangzugwasser stark beeinflussten Pedons III/A (Tab. 3.3.) und III/E (Tab. A.18.; Hanggley-Podsole). Trotz intensiver Verwitterung, die durch mineralogische Untersuchungen nachgewiesen wurde (Kap. 5.), liegt nur in dem 1cm mächtigen Aeh-Horizont des Profils III/A eine Mg-Verarmung vor, während in der gesamten Hauptfolge die Mg-Gehalte der Feinerde jene der Basisfolge übertreffen. Dies ist vermutlich auf lateralen Transport durch das Hangzugwasser zurückzuführen, da mineralogische Untersuchungen in der Mineralzusammensetzung (nicht hinsichtlich Gefüge) ein homogenes Ausgangsmaterial für das Pedon III/A belegen. Die Zufuhr von Ca und Mg könnte in diesen Hanggley-Podsohlen III/A, III/D und III/E als Ca- und Mg-Humate erfolgen.

Das K:Ca-Verhältnis der Gesamtgehalte liegt in den Böden dieses Standortes bei ca. 10:1. Trotzdem ist ein Ca/K-Antagonismus bei der Nährstoffaufnahme nicht zu befürchten, da die K-Sättigung der Austauschergumme zumindest in der durchwurzelten Hauptfolge weit hinter der Ca-Sättigung zurückbleibt (Kap. 3.2.6.).

Eine Differenzierung in der Mg-Ausstattung der Böden (aus verschiedenartigem Gestein) unter kranken und gesunden Fichten, wie sie ZÖTTL und MIES (1983) auf Standorten des Belchengebietes im Südlichen Schwarzwald fanden, konnte weder am Standort Rachel noch am Enzianfild bestätigt werden. Dies war zu erwarten, da hier Fichten mit starker Vergilbung unmittelbar an schwächer vergilbte Bestände auf gleichem Gestein grenzen. Hingegen zeigte sich für die insgesamt 100 eingewerteten Bäume am Rachel im Vergleich zu den Verhältnissen am Kohlschachten

Standort: Rachel (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mg _t	Fe _t mg/g	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t /
Hangley- Podsol (III/A)	Of	6.5- 2	3.80	2.88	1.05	1.85	0.69	0.55	5.09	-	-	8.44	0.027	0.115
	Oh	2 - 0	3.81	2.83	1.75	2.72	0.58	0.37	5.15	-	-	12.51	0.022	0.061
	A(e)h	- 1	4.50	3.31	8.75	18.05	1.99	1.64	22.28	-	-	49.29	0.013	0.026
	GoAhe	-10	5.15	3.89	9.11	19.25	2.54	7.06	49.85	0.256	0.395	69.95	0.019	0.071
	Bvs	-14	5.04	4.00	10.75	22.85	2.97	7.92	51.60	0.395	0.516	66.86	0.035	0.097
	Bsv	-18	4.95	4.16	11.05	21.35	2.25	7.68	42.90	0.533	0.79.20	0.038	0.104	0.104
	Bv	-23	4.92	4.41	8.15	19.05	2.22	7.43	37.54	0.642	0.642	50.18	0.048	0.104
	IICvBv	-35	4.71	4.49	7.25	21.05	2.27	4.70	37.94	0.682	0.682	73.73	0.057	0.099
	BvCv	-49	4.68	4.51	8.81	23.93	2.23	4.58	48.93	0.782	1.05.07	105.07	0.057	0.100
	(Bv)Cv	-80	4.71	4.50	7.85	26.92	2.03	4.05	53.84	1.026	1.026	129.83	0.074	0.125
Braunerde- Podsol (III/B)	Of	7.5- 4	4.10	3.30	1.00	1.32	0.70	0.48	4.87	-	-	10.65	0.021	0.058
	Oh	4 - 0	4.08	3.31	1.25	1.65	0.59	0.49	7.94	-	-	15.01	0.016	0.050
	A(e)h	- 4	4.65	3.51	7.55	15.05	1.93	2.04	22.79	-	-	48.64	0.014	0.034
	(Bs)Aeh	- 8	4.88	3.58	7.91	16.72	3.24	2.23	27.85	-	-	61.98	0.012	0.037
	Bsv	-14	4.96	3.72	18.21	19.95	2.17	4.58	47.50	0.236	0.409	61.28	0.021	0.062
	Bv1	-21	5.41	4.41	14.00	23.62	5.26	9.30	30.67	0.409	0.409	82.05	0.029	0.097
	Bv2	-31	5.43	4.52	11.00	23.62	2.92	6.35	26.69	0.354	0.354	74.90	0.032	0.092
	IICvBv	-58	4.70	4.52	10.32	23.40	3.40	6.55	33.99	0.516	0.516	79.85	0.039	0.134
	BvCv	-85	4.63	4.42	5.95	27.70	1.01	9.97	59.09	1.118	1.118	131.21	0.037	0.175
Braunerde- Podsol (III/C)	Of	8.5- 3	4.40	3.41	1.00	1.35	0.41	0.04	3.46	-	-	13.65	0.024	0.053
	Oh	3 - 0	4.91	3.54	2.15	2.20	0.50	0.58	7.63	-	-	15.00	0.028	0.035
	Ahe	- 3	4.55	3.71	8.42	17.60	2.19	3.05	27.22	-	-	56.83	0.022	0.046
	Bvs	- 6	4.62	3.81	8.32	20.70	4.14	3.77	35.84	0.185	0.185	70.12	0.028	0.045
	Bsv	-21	5.02	3.91	10.15	22.40	2.59	6.14	48.72	0.421	0.421	92.77	0.033	0.079
	Bv	-32	5.08	4.38	11.65	25.15	2.98	7.99	44.85	0.515	0.515	86.51	0.03	0.099
	IICvBv	-56	5.26	4.52	12.00	26.05	3.84	8.14	41.23	0.522	0.522	85.31	0.031	0.099
	BvCv	-72	4.98	4.62	13.82	26.80	3.90	9.16	41.76	0.713	0.713	88.36	0.049	0.118

Tab.3.3.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde ausgewählter Pedons am Standort Rachel (Fortsetzung Tab.A.18. im Anhang).

eine stärkere Vergilbung (25% gegenüber max.15%) bei deutlich geringeren Mg-Gesamtgehalten (Abb.3.9.). Die Mg-Sättigung der Austauscher war dagegen im durchwurzelten Solum am Rachel und am Kohlschachten gleich niedrig.

Bezüglich der Na-Gesamtgehalte unterscheiden sich die Granit-und Gneis-standorte nicht. Der Na-Anteil der Plagioklasse am Rachel scheint, darauf lassen die $Na_1:Ca_1$ -Verhältnisse schließen, sehr hoch zu liegen, so daß offensichtlich relativ verwitterungsstabile Albite in der Feinerde vertreten sind.

Die Verteilung der Fe-, Al-und Mn-Gesamtgehalte ist wiederum vor allem von der genetischen Stellung der Pedons geprägt (vgl. Abb.3.9. und Kap.3.2.2.). Außer in den vom Hangzugwasser beeinflussten Pedons zeichnet sich für Fe gewöhnlich eine Verarmung der Hauptfolge gegenüber der Basisfolge ab. Al und Mn sind in allen Pedons aufgrund ihrer höheren Mobilität erst tief in der Basisfolge angereichert.

Im Vergleich zum Granitstandort Kohlschachten liegen am Rachel höhere Cu-Gesamtgehalte in der Feinerde vor. Eine biogene Akkumulation des Cu deutet sich in einigen Pedons in höheren Cu-Gehalten der O-Horizonte im Vergleich zum Aeh an. Das bei der Biotitverwitterung freigesetzte Cu ist vermutlich mobil und wird entweder in den Unterboden transportiert oder in den Bieckreislauf einbezogen. Mit dem Anstieg des pH-Wertes in größerer Profiltiefe wird Cu durch den Ton sorbiert (STAHR et al. 1977).

Ebenso wie Cu ist auch Zn in den Auflagen am Rachel und Enzianfilz akkumuliert und steigt im Mineralboden mit zunehmender Tiefe an. Die Gehalte liegen ähnlich hoch wie am Granitstandort Kohlschachten. Auf eine mögliche Erhöhung der Cu- und Zn-Gehalte in den Auflagehorizonten durch Immissionsbelastung wurde bereits hingewiesen (Tab.3.3., 3.4., A.18. und A.19.)

ENZIANFILZ (Paragneis)

Die Böden im Untersuchungsgebiet ENZIANFILZ sind mit Ca_1 und Mg_1 von allen untersuchten Bodenformen am schlechtesten ausgestattet (vgl. Tab.3.4. und Abb.3.10.). Das Ausgangsgestein der periglazialen Deckschichten ist ähnlich wie am Rachel ein plagioklasarmer Paragneis. Die chemische Zusammensetzung der mineralischen Feinerde ist deshalb in den beiden Untersuchungsgebieten Rachel und Enzianfilz ähnlich. Das niedrige $Ca_1:Na_1$ -Verhältnis deutet auch am Enzianfilz auf albitreiche, verwitterungsstabile Plagioklasse hin. Die K_1 -Gehalte sind wie in den anderen Bodenformen aus saurem Ausgangsgestein hoch. Dabei liegt das K jedoch vorwiegend fest gebunden in Glimmern und Kalifeldspäten vor; an den Austauscherpositionen ist es vor allem im Oberboden nur schwach vertreten (Kap.3.2.6.).

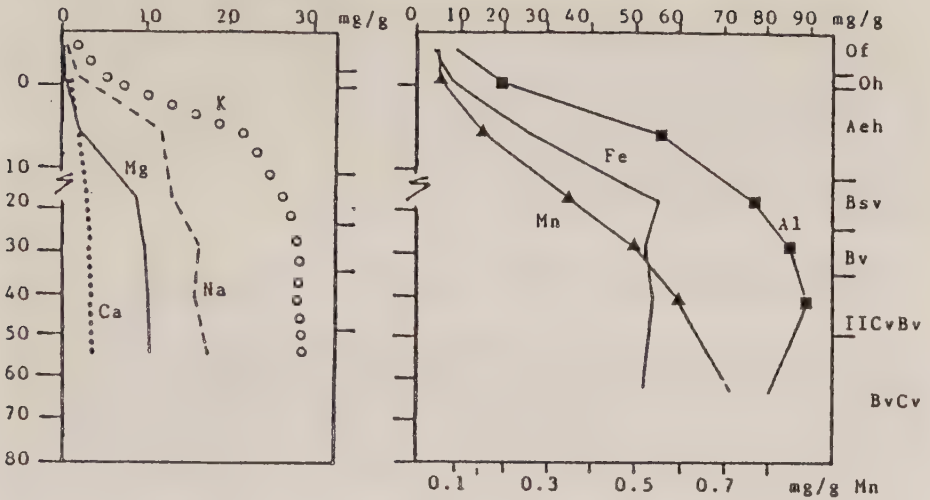
Die im Vergleich zum Rachel niedrigeren pH-Werte (vgl. Abb.3.8., Tab.3.4.) im Oberboden beschleunigen die Protolyse, so daß insbeson-

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mg _t mg/g	Fe _t	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t /
Gley- Podsol (VII/A)	Of	25	-20	3.50	2.83	0.68	2.08	1.04	0.39	4.22	0.05	4.51	0.02	0.11
	Oh	20	-0	3.65	2.79	1.10	2.03	0.81	0.29	9.81	0.02	6.57	0.01	0.06
	Aeh	-10	4.30	3.60	3.60	12.43	18.00	2.63	2.88	25.03	0.10	62.65	0.02	0.04
	Bhs	-14	4.46	3.83	3.83	11.68	20.93	2.27	6.88	63.13	0.18	73.95	0.03	0.08
	B(h)s	-21	4.43	3.94	3.94	10.95	24.35	1.92	8.75	59.18	0.25	83.78	0.04	0.10
	GoBvs	-29	4.57	4.06	4.06	11.83	25.30	1.99	9.63	50.43	0.27	82.15	0.04	0.11
	GoB(s)v	-35	4.59	4.10	4.10	11.00	28.55	1.93	10.04	49.98	0.30	85.28	0.04	0.11
	(Bv)Gr	-50	4.87	4.19	4.19	11.83	27.58	2.10	10.16	44.75	0.27	84.15	0.04	0.11
	IICvBv	-80	4.73	4.17	4.17	15.85	30.15	3.21	12.31	55.33	0.37	100.63	0.05	0.12
	Of	11	-5	3.61	2.94	0.80	1.93	1.39	0.44	4.60	0.09	6.27	0.02	0.07
Eisen- Humus- Podsol (VII/B)	Oh	5	-0	3.76	3.00	1.40	2.10	0.98	0.37	7.75	0.05	9.67	0.03	0.06
	Ahe	-9	4.06	3.20	3.20	9.40	24.60	1.58	1.41	20.07	0.05	55.10	0.02	0.02
	Bsh	-15	4.07	3.44	3.44	10.40	24.30	1.63	6.33	56.65	0.13	73.43	0.04	0.08
	Bhs	-19	4.32	3.74	3.74	10.53	24.03	1.78	8.28	60.08	0.18	83.45	0.05	0.11
	Bsv	-24	4.45	4.00	4.00	13.18	26.30	1.96	9.31	52.88	0.22	85.55	0.06	0.12
	Bv	-32	4.59	4.28	4.28	12.35	26.80	2.11	9.18	49.78	0.31	93.68	0.06	0.13
	IICvBv	-46	4.71	4.40	4.40	12.45	27.88	2.01	8.57	46.05	0.33	87.35	0.06	0.13
	GoBvCv	-90	4.74	4.49	4.49	12.78	28.78	1.92	8.72	47.20	0.33	86.58	0.06	0.13
	Of	9	-5.5	3.79	3.06	0.68	1.75	0.82	0.39	5.30	0.05	10.04	0.02	0.05
	Oh	5.5	-0	3.75	3.13	1.23	2.00	0.83	0.44	8.37	0.03	16.41	0.02	0.04
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Aeh	-8	4.08	3.37	3.37	10.93	17.08	2.44	2.42	26.53	0.13	35.60	0.02	0.04
	Dvhs	-14	4.15	3.48	3.48	11.75	20.78	2.44	5.64	58.43	0.22	65.13	0.03	0.07
	B(v)s	-19	4.47	3.85	3.85	12.45	23.40	2.58	8.49	53.05	0.28	72.23	0.03	0.09
	IIBv	-26	4.61	4.24	4.24	13.20	24.95	2.80	8.56	43.43	0.31	69.38	0.04	0.10
	BvCv1	-56	4.86	4.19	4.19	12.68	25.93	2.82	8.45	43.75	0.33	72.78	0.03	0.09
	BvCv2	-72	5.12	4.75	4.75	15.45	27.38	3.90	10.17	42.15	0.45	80.83	0.04	0.12
	Of	9	-5.5	3.79	3.06	0.68	1.75	0.82	0.39	5.30	0.05	10.04	0.02	0.05

Tab.3.4.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde ausgewählter Pedons am Standort Enzianfilz (Fortsetzung Tab.A.19. im Anhang).

Podsol-Braunerde (VII/E)



podsolige Braunerde (V/D)

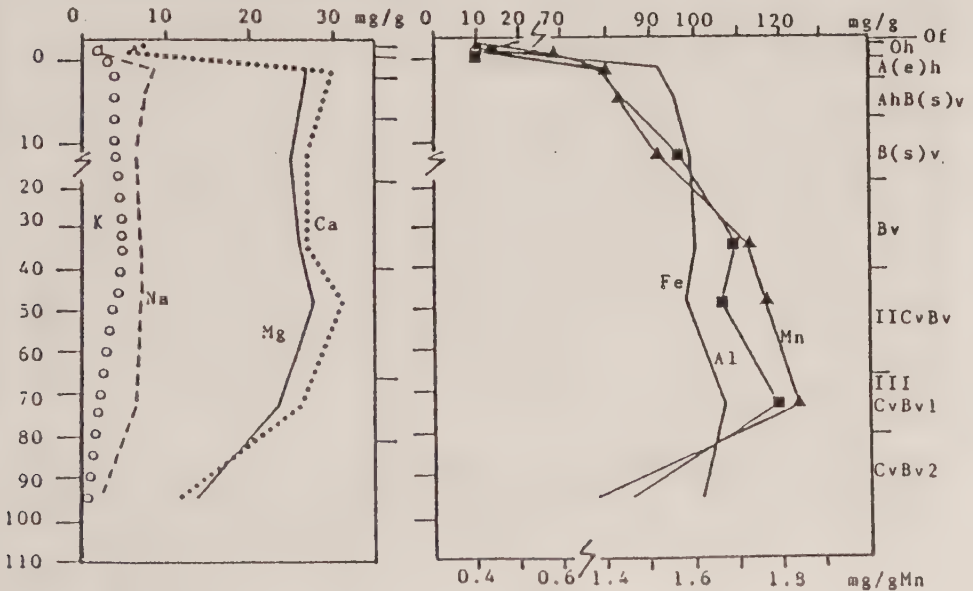


Abb.3.10.: Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde ausgewählter Pedons aus Paragneis (VII) und Amphibolit (V).

dere der Fe-haltige Biotit intensiv verwittert ist. Dies führt zu einer deutlichen Mg- und Fe-Verarmung in den obersten 20 cm des Mineralbodens. Gleiches gilt für die an den Biotit gebundenen Elemente Cu und Zn, die jedoch im Gegensatz zu Ca und Mg in den Auflagehorizonten schwach akkumuliert sind (Kap.3.2.7.). Die unter den herrschenden pH- und EH-Bedingungen ähnliche Mobilität von Zn und Mn und die bevorzugte Sorption des Zn an Mn-Oxiden (KEILEN 1978) erklären die parallele Zunahme beider Elemente mit der Tiefe. Die Schwermetallgehalte der Böden am Standort Enzianfild werden ausführlich in Kap.3.2.7. diskutiert.

HOHER BOGEN (Amphibolit)

Die Gesamtgehalte einiger Bielemente unterscheiden die Böden aus dem ultrabasischen Gestein deutlich von den bisher besprochenen Bodenformen aus saurem Ausgangsgestein. Der grünscharze Amphibolit ist gegenüber dem hellen Granit und den glimmer- und quarzreichen Paragneisen ein kiesel-säurearmes, feinkörniges Gestein, das hohe Gehalte an Fe- und Mg-reichen Hornblenden und Ca-reichen Plagioklasen aufweist. Deshalb sind die Ca-, Mg-, Mn- und Fe-Gehalte im Vergleich zu Böden aus kiesel-säurereichem Granit und Paragneis deutlich erhöht, die K und Na-Gesamtgehalte liegen dagegen niedriger (Abb.3.10., Tab.3.5.).

Verglichen mit sauren Magmatiten und Metamorphiten haben basische Gesteine wesentlich höhere Cu-Gehalte (Faktor 5) wegen ihres höheren Anteils an Cu-Sulfiden wie Chalkopyrit (JURELT et al.1984). Auch die Gehalte von Zn sind in basischen Gesteinen gegenüber Granit und Gneis i.a. um den Faktor 2 erhöht. Dementsprechend hoch liegen die Zn-Nadelspiegelwerte am Standort Hoher Bogen (vgl. ZIESAK 1988).

Die reiche Ausstattung der Amphibolitböden mit Ca_i und Mg_i spiegelt sich jedoch nicht in der Basensättigung und im Gehalt an austauschbarem Ca und Mg wieder (Tab.3.5.). Auch ihre pH-Werte entsprechen durchaus denen von Bodenformen aus Graniten und Paragneisen. Die Mg-Spiegelwerte von z.T.bereits deutlich vergilbten, etwa 15-jährigen Jungfichten lagen mit 0.83mg/g TS (1/2-jährigen Nadeln) und 0.6mg/g TS (3 1/2-jährigen Nadeln) dicht bei dem für eine ausreichende Mg-Versorgung geltenden Grenzwert von 0.8mg/g TS (1/2-jährigen Nadeln). Sie lassen bereits eine ausgeprägte Verlagerung aus den älteren in die jüngeren Nadeln erkennen. Hingegen zeigen die Nadelspiegelwerte für Ca eine ausreichende Versorgung mit diesem Element an (ZIESAK 1988). Die insgesamt etwas bessere Ca- und Mg-Versorgung der Bestände am Hohen Bogen (BOSCH 1983,1986) findet sich auch in den gegenüber den Granit- und Gneisstandorten deutlich höheren Ca- und Mg-Gesamtgehalten der Auflagerhorizonte wieder (Abb.3.10.;Tab.3.5.).

Die hohen Ca- und Mg-Gehalte der Silikate und die feinere Körnung der Feinerde auf Amphibolit sollten eigentlich zu einer höheren Silikatverwitterungsrate verglichen mit Böden aus Granit und Gneis-führen. Mineralogische Untersuchungen der Feinsand und Grobschluff-Fractionen im Pedon V/D zeigten jedoch, daß die Mg-reiche Hornblende vor allem in

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mgt mg/g	Fe _t	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t /
podsolige Braunerde (V/A)	Of	4 - 3	3.90	3.01	4.05	3.45	17.86	11.79	35.07	0.67	26.04	0.041	0.138	
	Oh	3 - 0	3.89	2.95	3.60	2.03	11.15	4.23	16.95	0.38	10.04	0.039	0.146	
	A(e)n	- 10	4.01	3.39	3.00	5.13	40.06	30.77	83.28	1.72	58.94	0.037	0.119	
	A(e)hBv	- 16	4.50	3.77	9.55	5.13	43.77	32.46	89.57	1.82	59.45	0.038	0.131	
	Bv	- 37	4.75	4.19	10.30	5.15	43.44	34.05	83.23	1.72	67.67	0.046	0.146	
Podsol- Braunerde (V/B)	IICvBv	- 48	4.78	4.28	10.25	7.43	39.48	32.72	74.65	1.94	75.32	0.051	0.136	
	Of	9 - 3	3.61	2.89	0.55	1.14	3.72	0.81	6.27	0.25	4.75	0.031	0.144	
	Oh	3 - 0	3.29	2.61	0.93	1.25	2.87	0.92	7.28	0.15	6.54	0.037	0.121	
	A(e)h	- 11	3.60	3.00	8.75	7.35	33.67	23.73	71.00	1.12	45.75	0.023	0.115	
	A(e)hBsv	- 21	4.11	3.55	8.60	7.82	30.21	21.55	68.05	1.16	54.92	0.034	0.093	
Podsol- Braunerde (V/C)	Bsv	- 51	4.60	4.11	8.23	9.85	24.89	19.88	65.00	1.00	61.42	0.034	0.099	
	IICvBv	- 76	4.60	4.23	8.10	14.84	17.67	18.75	40.93	0.84	47.97	0.048	0.107	
	BvCv	- 90	4.61	4.22	9.15	16.07	19.26	19.04	52.05	1.11	67.01	0.054	0.101	
	Of	5.5- 2	4.06	3.32	1.45	1.35	5.14	2.04	8.83	0.70	5.75	0.024	0.126	
	Oh	2 - 0	4.15	3.19	2.65	1.98	10.23	6.28	25.08	0.52	16.75	0.039	0.148	
podsolige Braunerde (V/D)	Aeh	- 12	4.10	3.16	9.40	2.95	35.87	28.59	93.62	1.58	54.27	0.042	0.107	
	B(s)v	- 21	4.81	3.81	8.73	2.78	36.86	29.84	101.25	1.73	66.48	0.048	0.108	
	Bv	- 44	5.08	4.19	10.00	3.57	37.91	32.17	97.47	1.73	81.14	0.074	0.135	
	IICvBv1	- 75	4.90	4.37	9.90	5.26	41.25	33.14	99.63	1.75	80.74	0.073	0.134	
	CvBv2	- 105	4.66	4.30	11.00	5.58	41.83	32.14	101.93	1.84	83.27	0.074	0.122	
podsolige Braunerde (V/D)	IIBvCv	>105	4.46	3.97	8.13	3.47	39.23	31.83	113.84	1.97	89.97	0.088	0.111	
	Of	2.5- 2	4.70	4.07	2.18	3.00	8.73	6.12	26.54	0.39	25.00	0.042	0.124	
	Oh	2 - 0	3.89	3.09	1.25	1.87	4.53	3.48	12.74	0.58	10.00	0.012	0.083	
	A(e)h	- 2	3.81	3.12	8.70	3.86	29.95	26.53	91.95	1.44	78.75	0.034	0.103	
	AhB(s)v	- 7	4.06	3.39	7.40	4.14	29.00	25.93	95.94	1.43	83.27	0.033	0.144	
podsolige Braunerde (V/D)	B(s)v	- 19	4.60	3.99	6.78	4.00	27.38	24.81	98.74	1.52	97.12	0.035	0.116	
	Bv	- 49	4.80	4.30	7.23	4.75	27.43	26.18	100.35	1.73	110.49	0.052	0.165	
	IICvBv	- 66	4.73	4.39	7.20	4.15	31.05	28.33	98.35	1.76	106.52	0.069	0.135	
	IICvBv1	- 81	4.68	4.21	6.43	2.38	25.83	23.51	106.75	1.88	118.91	0.066	0.114	
	CvDv2	- 110	4.49	4.04	2.70	0.89	11.85	13.53	92.17	1.11	86.37	0.131	0.074	

Tab. 3.5.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte in der silikatischen Feinerde der Pedons am Standort Hoher Bogen.

der Feinsandfraktion angereichert und somit für die chemische Verwitterung relativ schwer zugänglich ist. Die niedrigen pH-Werte im oberen Solum und die hohe Al-Sättigung der Austauscher im gesamten Mineralboden (Kap.3.2.6. und Tab.3.9.) weisen darauf hin, daß die Verwitterung der reichlich vorhandenen Ca- und Mg-Silikate zu langsam abläuft, um die Basensättigung hoch zu halten. Zudem sind die für schnelle Pufferreaktionen in sauren Böden verantwortlichen reaktiven Al-Hydroxide-Verbindungen (d.h. die Fraktion des oxalatlöslichen Al) bereits weitgehend aus dem Oberboden in den Unterboden verlagert.

Die Al-Sättigung der Austauscher ist auch in der von holozänen pedogenetischen Prozessen nur wenig beeinflussten Basisfolge unverändert hoch (>80%). Sie besitzt pH(H₂O)-Werte unterhalb 5, und auch in diesem Stratum dominiert der Kaolinit in der Tonfraktion. Deshalb ist davon auszugehen, daß es bereits während der intensiven Verwitterung unter tropischen Bedingungen im Tertiär zu einer ausgeprägten Verarmung von Alkali- und Erdalkalitionen gekommen sein muß, v.a. durch Abbau von leicht angreifbaren Silikaten in der Schlufffraktion. Die für Böden auf basischem Gestein im gemäßigten Klima typische Montmorillonitbildung fand nicht statt. Somit war meines Erachtens die Ausgangssituation zu Beginn der holozänen Pedogenese für die Böden am Hohen Bogen bis zu einem gewissen Grad ähnlich wie auf saurem Granit und Paragneis. Die Böden sind auch hier seit langem stark sauer, wobei möglicherweise eine "neuzeitliche" Versauerung durch auffallend niedrige pH-(CaCl₂) Werte von 3 im Oberboden angedeutet wird, die jedoch mit einer relativ hohen Basensättigung einhergehen.

3.2.6. Kationen-Austauscheigenschaften

EFFEKTIVE KATIONENAUSTAUSCHKAPAZITÄT

Im Gegensatz zu den lithogenen Unterschieden in den Gesamtgehalten der Böden an Ca, Mg, Na und K (Fe, Al) aus ultrabasischem und saurem Ausgangsgestein, differieren die Kationen-Austauscheigenschaften der Hochlagenböden im Inneren Bayerischen Wald nur wenig.

Wegen des amphoteren Charakters der Fe- und Al-Oxide- und Hydroxide und einer Bodenreaktion, die unterhalb ihres isoelektrischen Punktes liegt, sind sie vermutlich positiv geladen und tragen daher nicht mehr nennenswert zur Kationenadsorption bei, sondern sorbieren Anionen. Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK eff.) der hier untersuchten Böden wird deshalb v.a. durch den Humus- und Tongehalt, den Tonmineralbestand und den pH-Wert bestimmt. Dementsprechend übertrifft die KAK eff. in der humus- und tonreicheren Hauptfolge jene der dichtgelagerten nicht durchwurzelten Basisfolge. Insgesamt nimmt die KAK eff. in allen Bodenformen mit zunehmender Profiltiefe ab; nur in den durch Humus - einspülung gekennzeichneten Bh-Horizonten der Eisenhumuspodsole (II/A, C und VII/B) ist ein 2. Maximum ausgebildet.

Die eff. KAK erreicht im durchwurzelten Mineralboden Werte zwischen 5 bis 13 mmol IÄ/100g TB. Obwohl in den Amphibolit-Braunerden die Tongehalte in der Hauptfolge mit 26-32% deutlich über jenen der Pedons auf Granit und Paragneis (max. 20%) liegen, weisen die Böden am Hohen Bogen keine höhere Austauschkapazität auf. Dieser Befund beruht mutmaßlich auf dem für alle Standorte recht einheitlichem tiefen pH-Wert. Zudem dominiert in der Tonmineralfraktion auf Amphibolit der Kaolinit, der gegenüber den Dreischichttonmineralen eine deutlich geringere Austauschkapazität besitzt (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984).

Nach MEIWES (1984) sind Böden mit einer KAK eff. zwischen 5 und 15 mmol IÄ/100 g TB hinsichtlich Säuretoxizität nur wenig elastisch.

AUSTAUSCHBARES CALCIUM und MAGNESIUM

Die Basensättigung in den Auflagehumushorizonten ist deutlich nach Standorten differenziert. Die Basensättigung (austauschbares Ca, Mg und K/Austauschkapazität; vgl. Tab. 3.10.) schwankt auf Amphibolit zwischen 40 und 85%, auf Granit zwischen 7 und 45% und auf Gneis zwischen 7 und 30%. Die hohe Basensättigung in der Auflage der Amphibolit-Böden ist durch die hohe Ca-Sättigung zu erklären, die 50% erreicht und sich auch in der günstigeren Ca-Versorgung der Bestände widerspiegelt (BOSCH 1986). Die Ca-Sättigung am Kohlschachten hingegen liegt unter 40%, jene am Rachel und Enzianfilz (Paragneis) erreicht nur Werte zwischen 3 und 20%.

Die bessere Ca-Ernährung der Fichten am Hohen Bogen geht auch einher mit höheren Gehalten an Austausch-Ca in den humusreichen A-Horizonten. Sie liegen in den A-Horizonten auf Amphibolit zwischen 300 und 450 µg/g, während sie auf Granit nur 150-200 und auf Gneis (mit wenigen Ausnahmen) unter 100 µg/g absinken. Insgesamt ist der austauschbare Ca-Anteil in den humusreichen Horizonten aller Untersuchungsgebiete (A- und Bh-Horizonte) deutlich höher als in den darunterliegenden, noch durchwurzelten Horizonten der Hauptfolge, und mit zunehmender Profiltiefe verwischen sich die standörtlichen Unterschiede (Tab. 3.6-3.9.). In den Ah-Horizonten liegen andererseits die niedrigsten pH-Werte des Mineralbodens vor. Die dennoch hohe Ca-Sättigung der Ah-Horizonte hat nach SÜSSER (1987) mehrere Gründe: Offensichtlich kann Ca an den Austauschplätzen der organischen Stoffe besser gegen Al und Protonen konkurrieren. Weiterhin wird durch die Mineralisation von Streu Ca für die Bildung von Ca-Humaten nachgeliefert. Die geringeren Gehalte an Mineralbestandteilen mögen außerdem dazu führen, daß weniger Al mobilisiert wird. Dieses dürfte vorwiegend komplex gebunden sein und wird deshalb weniger um Bindungsplätze konkurrieren. Eventuell sind auch die Al-liefernden Puffersubstanzen (Al-Hydroxo-Polymere) im Ah größtenteils verbraucht.

In den humosen A(e)h-Horizonten liegt das molare $\text{Ca}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ -Verhältnis bei allen Bodenformen zwischen 0,3 und 0,1 und sinkt bei Humusgehalten <2% auf Werte <0,1. Das molare $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ -Verhältnis variiert in den A-Horizonten der Böden aus Gneis zwischen 0,01 und 0,03, erreicht auf

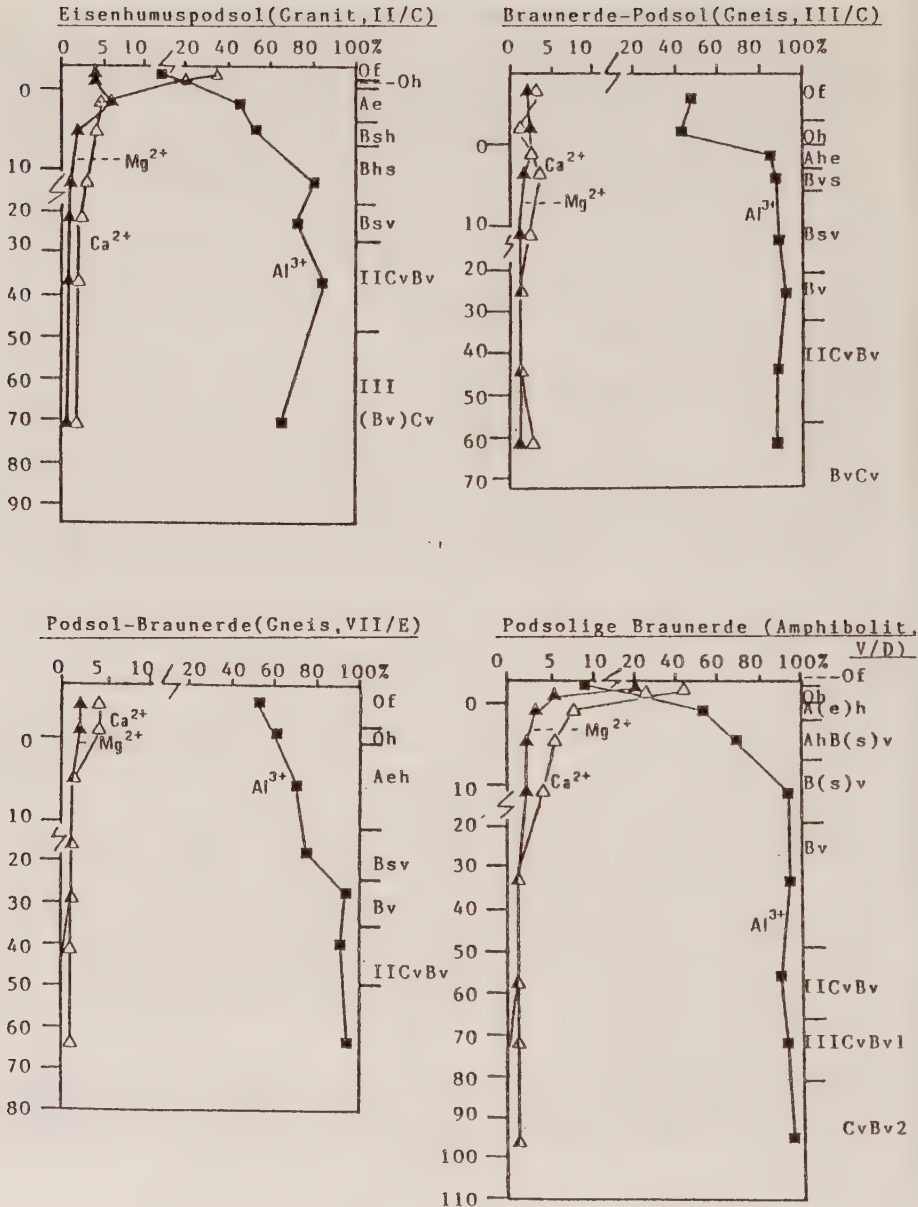


Abb.3.11.: Ca-, Mg- und Al-Sättigung der Austauscher in ausgewählten Pedons aus verschiedenem Muttergestein.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK _{eff.} /	Ca	Mg	K mmol IX/100 g	Na IX/100 g	Fe	Al _{ges.}	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
Eisen-Humus- Podsol (11/A)	Of	6 - 4.5	26.88	6.18	1.40	1.26	0.97	0.86	6.88	12.73	3.35	36.5
	Oh	4.5-0	22.28	0.74	0.41	0.52	1.17	1.25	13.36	8.41	9.76	12.7
	Ae	-3	5.73	0.07	0.03	0.04	0.12	0.15	5.09	1.06	4.50	4.4
	Bsh	-5	8.71	0.12	0.05	0.06	0.26	0.20	8.02	1.17	6.85	5.5
	B(v)s	-7	6.11	0.07	0.02	0.06	0.16	0.02	5.63	-	5.79	5.1
	Bsv	-14	4.82	0.03	0.02	0.05	0.22	0.07	4.48	-	4.42	6.8
	IIcVbV	-30	2.76	0.04	0.01	0.05	0.14	0.04	2.05	-	2.49	8.6
	BvCv1	-60	2.21	0.05	0.01	0.05	0.30	0.03	1.48	-	1.78	18.4
	BvCv2	-82	2.13	0.06	0.01	0.08	0.28	0.03	1.31	-	1.68	19.8
Braunerde- Podsol (11/B)	Of	5 - 2.5	17.18	6.54	0.46	0.86	0.98	0.52	3.32	5.24	2.43	51.5
	Oh	2.5-0	17.94	3.97	0.52	0.79	1.59	0.16	4.51	7.11	3.69	38.2
	Aeh h	-3	8.91	0.39	0.25	0.18	0.18	0.14	7.44	1.45	6.29	11.2
	Ahe	-9	6.08	0.33	0.10	0.07	0.19	-	5.33	-	5.35	11.3
	Bvs	-15	6.05	0.15	0.05	0.05	0.39	-	5.47	-	5.38	10.6
	CvBv	-20	4.51	0.11	0.01	0.03	0.12	-	4.26	-	4.22	6.0
	CvBv	-35	3.41	0.14	0.01	0.02	0.01	-	2.92	-	2.96	5.0
	IIbVcV	-65	2.64	n.b.	0.01	0.03	0.51	-	1.91	-	2.08	20.6
	IIICv	-85	3.82	0.21	0.01	0.05	0.18	-	1.16	-	1.44	11.6
Eisen-Humus- Podsol (11/C)	Of	3-0	20.71	7.04	0.84	0.59	1.28	0.40	2.91	7.44	2.86	47.1
	Oh	1-0	25.58	4.21	1.09	0.83	1.87	0.98	9.03	10.50	5.98	31.2
	Ahe	-4	5.74	0.29	0.37	0.22	0.99	0.08	3.03	1.26	2.52	32.7
	Bsh	-7	13.50	0.34	0.33	0.24	1.66	0.19	8.6	1.89	7.06	19.0
	Bhs	-18	8.53	0.13	0.07	0.13	1.37	0.01	6.33	-	6.82	19.9
	Bsv	-27	6.51	0.13	0.06	0.11	1.63	-	4.61	-	4.59	29.5
	IIcVbV	-48	3.75	0.06	0.01	0.07	0.45	-	3.01	-	3.15	15.9
	III(Bv)Cv	-94	2.71	0.05	0.02	0.09	0.46	-	1.72	-	2.09	23.0

Tab.3.6.: Kationen-Austauscheigenschaften in Pedons am Standort Kohlschachten (Granit).
(Al_{ges.} = am AAS bestimmt; Al³⁺ = potentiometrische Titration)

Granit 0.06 und auf Amphibolit 0.07-0.11. Die schwache Mg- und Ca-Sättigung der Austauscher bei hoher Al-Belegung (Abb.3.11.) geht einher mit einer sehr geringen relativen Eintauschstärke der Mg- und Ca-Ionen aus der Bodenlösung an die Austauscheroberflächen, d.h. mit niedrigen Gapon-Koeffizienten der Ionenpaare Mg^{2+}/Al^{3+} und Ca^{2+}/Al^{3+} (HILDEBRAND 1986). Die Speicherefähigkeit der untersuchten Hochlagenböden für Mg ist also gering.

Die Anteile von austauschbarem Ca und Mg an der KAK eff. liegen in den humusreichen Horizonten der Hauptfolge auf Gneis i.d.R. bei knapp 5%. Dies weist nach MEIWES et al. (1984) auf eine sehr geringe Elastizität hinsichtlich Säuretoxizität und auf eine äußerst schwache Mg-Ausstattung hin (1-2% austauschbares Mg; Abb.3.11.). Auf dem Granit-Standort erreicht der Anteil von austauschbarem Ca und Mg an der KAK im Oberboden 2-10% (sehr geringe bis geringe Elastizität hinsichtlich Säuretoxizität). Der Anteil an austauschbarem Mg liegt jedoch mit 2-3% ähnlich hoch wie am Hohen Bogen (Amphibolit, Abb.3.11.). Insgesamt ist die Belegung der Austauscher mit Ca und Mg am Hohen Bogen mit 5-15% deutlich höher als auf saurem Ausgangsgestein; demnach besitzen aber die Böden am Hohen Bogen nach MEIWES hinsichtlich der Säuretoxizität ebenfalls nur eine geringe Elastizität.

Die gute Versorgung der Fichten mit Phosphor auf verschiedenen Standorten in den Hochlagen des Bayerischen Waldes (BOSCH 1986; ZIESAK 1988) spricht allerdings gegen eine unspezifische Säuretoxizität und die damit verbundenen Reduktion der aufnahmefähigen Feinwurzelmasse. Eine spezifische Hemmung der Ca- und der Mg-Aufnahme durch hohe Al-Konzentrationen in der Bodenlösung ist wahrscheinlicher. Ein solcher Antagonismus wurde in mehreren experimentellen Studien bestätigt (vgl. EVERS 1983, JORNS und HECHT-BUCHHOLZ 1985, MAKKONEN-SPIECKER 1985, zit. in BOSCH 1986).

AUSTAUSCHBARES KALIUM UND Natrium

BOSCH (1986) fand bei seinen nadelanalytischen Untersuchungen an Fichten am Hohen Bogen eine schwache K-Versorgung im Vergleich zu Beständen auf saurem Ausgangssubstrat; örtlich deutete sich sogar ein latenter K-Mangel an. Da dieser mit unzureichender Mg-Ernährung einhergeht, ist mit einer erhöhten Frostanfälligkeit der Bäume zu rechnen.

Auch die K-Spiegelwerte unserer Fichten um das Profil V/D am Hohen Bogen lagen unterhalb des Grenzwertes für K-Mangel von 3.5-4mg/g TS (HÜTTL 1986; ZIESAK 1988), während die Fichten auf Granit am Kohlscharten um Profil II/C diesen deutlich übertrafen. Die Gehalte an austauschbarem K liegen nach eigenen Untersuchungen in der durchwurzelten Hauptfolge auf Amphibolit bei 0.13, auf Granit bei 0.09 und auf Gneis bei 0.11 mmol IA/100g TB (Tab.3.6.-3.9.). Diese geringen Unterschiede zwischen den Standorten hinsichtlich der K-Belegung der Austauscher stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen der K-Gesamtgehalt-Bestimmung (Kap.3.2.5.). Das Ca_K/K_K -Verhältnis liegt am Hohen Bogen bei 7:1; auf

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK /	Ca	Mg	K mmol IA/100 g	Na	Fe	Al ges.	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
Hangley- Podsol (III/A)	Ol	6.5- 2	22.72	2.30	0.97	1.29	0.51	1.01	8.158	11.09	5.48	22.3
	Oh	2 - 0	26.78	1.28	0.89	1.22	1.26	1.10	13.84	11.39	9.61	17.4
	A(e)h	- 1	7.71	0.15	0.18	0.17	0.37	0.12	5.93	1.90	4.82	11.3
	Gokhe	-10	7.88	0.15	0.08	0.11	1.13	0.08	6.16	-	6.33	18.7
	Bvs	-14	6.42	0.14	0.05	0.07	0.57	0.06	5.30	-	5.59	12.8
	Bsv	-18	4.97	0.13	0.03	0.05	0.30	0.03	4.16	-	4.45	10.1
	Bv	-23	2.84	0.04	0.01	0.04	0.15	0.02	2.24	-	2.58	8.4
	IICvBv	-35	2.31	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	1.86	-	2.22	3.2
	BvCv	-49	2.04	0.03	0.01	0.05	0.02	-	1.49	-	1.93	5.4
	(Bv)Cv	-80	2.20	0.03	0.01	0.19	0.04	-	1.24	-	1.92	12.8
Podsol- Braunerde (III/B)	Ol	7.5- 4	24.58	0.40	0.30	0.84	0.3	0.73	13.84	5.68	16.3	7.5
	Oh	4 - 0	21.19	0.43	0.36	1.04	1.19	1.38	19.68	5.52	11.24	14.3
	A(e)h	- 4	10.27	0.88	0.16	0.17	0.71	0.33	7.54	1.38	6.61	18.7
	(Bs)Aeh	- 8	9.38	0.81	0.11	0.12	0.75	0.2	6.39	1.18	6.17	19.1
	Bsv	-14	7.3	0.94	0.08	0.06	0.33	0.09	5.58	-	5.77	19.3
	Bv1	-21	3.22	0.80	0.03	0.06	0.35	-	1.79	-	1.96	38.5
	Bv2	-31	2.98	0.77	0.05	0.06	0.54	-	1.15	-	1.54	47.6
	IICvBv	-58	1.85	0.75	0.02	0.03	n.b.	-	0.93	-	1.04	43.2
	BvCv	-85	2.58	0.77	0.03	0.07	0.1	-	1.29	-	1.61	37.6
Braunerde- Podsol (III/C)	Ol	8.5- 3	20.24	0.51	0.38	1.03	0.71	0.49	11.99	4.67	9.68	13.0
	Oh	3 - 0	21.75	0.22	0.34	1.07	3.20	0.37	10.51	2.50	9.19	22.2
	Ahe	- 3	7.15	0.18	0.23	0.24	0.28	0.09	6.44	-	6.1	13.0
	Bvs	- 6	7.74	0.35	0.18	0.10	0.18	0.09	7.19	-	6.82	10.5
	Bsv	-21	6.97	0.21	0.08	0.09	0.39	-	6.52	-	6.18	11.0
	Bv	-32	3.02	n.b.	0.01	0.03	0.16	-	2.96	-	2.81	6.4
	IICvBv	-56	2.41	0.04	0.01	0.05	0.2	-	2.27	-	2.12	12.0
	BvCv	-72	1.61			0.04	-	-	1.35	-	1.56	2.5

Tab.3.7.: Kationen-Austauscheigenschaften ausgewählter Pedons am Standort Rachel (Paragneis (Al ges. =am AAS bestimmt; Al³⁺ = potentiometrische Titration; Fortsetzung Tab.A.20)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK _{eff.} /	Ca	Mg	K mmol IX/100 g	Na IX/100 g	Fe	Al _{ges.}	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
Gley- Podsol (VII/A)	Of	25-20	22.33	3.08	1.42	1.90	0.38	1.01	3.64	11.31	3.16	30.3
	Oh	20-0	15.57	0.83	0.52	0.39	0.49	0.44	4.14	9.85	3.08	14.4
	Aeh	-10	9.09	0.14	0.06	0.05	0.15	0.27	7.92	1.32	7.10	4.4
	Bhs	-14	9.89	0.31	0.09	0.06	0.22	0.47	8.49	-	8.73	6.9
	B(h)s	-21	7.56	0.12	0.03	0.06	0.08	0.17	6.53	-	7.09	3.8
	GoBvs	-29	6.04	0.10	0.03	0.06	0.22	0.08	4.92	-	5.54	6.9
	GoB(s)v	-35	5.20	0.10	0.04	0.07	0.16	0.06	3.97	-	4.77	7.0
	(Bv)Gr	-50	6.38	0.20	0.20	0.17	0.10	1.09	3.79	-	4.60	10.5
	IICvBv	-80	4.57	0.10	0.05	0.11	0.09	0.05	3.67	-	4.16	7.7
Eisen- Humus- Podsol (VII/B)	Of	11-5	22.36	6.59	0.73	0.81	0.37	0.83	4.66	9.26	3.64	38.0
	Oh	5-0	26.77	4.03	0.59	0.62	1.41	0.87	11.94	10.37	8.82	24.9
	Ahe	-9	5.02	0.06	0.02	0.06	0.14	0.41	2.64	1.57	2.74	5.5
	Bsh	-15	10.65	0.16	0.05	0.07	0.13	0.47	9.05	1.80	7.96	3.9
	Bhs	-19	8.23	0.09	0.02	0.09	0.12	0.25	7.31	-	7.66	3.9
	Bsv	-24	5.24	0.08	0.02	0.09	0.12	0.06	4.46	-	4.88	5.8
	Bv	-32	3.66	0.05	0.08	0.09	0.03	0.03	3.50	-	3.44	5.0
	IICvBv	-46	2.94	0.07	0.01	0.09	0.04	-	2.34	-	2.76	5.9
	GoBvCv	-90	2.59	0.04	0.06	0.09	0.02	-	1.97	-	2.43	6.2
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Of	9-5.5	23.32	0.92	0.38	0.74	0.32	1.10	15.78	7.67	12.14	10.2
	Oh	5.5-0	27.13	0.79	0.60	0.74	0.20	1.10	20.11	7.78	15.83	8.9
	Aeh	-8	9.57	0.16	0.14	0.12	0.18	0.24	7.27	2.13	6.66	5.8
	Bvhs	-14	11.44	0.12	0.14	0.10	0.26	0.35	10.01	1.84	8.64	5.4
	B(v)s	-19	6.63	0.07	0.05	0.06	0.25	0.10	5.27	-	6.10	6.4
	IIBv	-26	3.68	0.03	0.02	0.04	0.20	0.02	2.44	-	3.36	7.9
	BvCv1	-56	4.08	0.06	0.03	0.06	0.32	-	2.61	-	3.62	11.4
	BvCv2	-72	1.91	0.05	0.02	0.06	0.29	-	0.84	-	1.50	21.9

Tab.3.8.: Kationen-Austauscheigenschaften ausgewählter Pedons am Standort Enzianfilz
(Al_{ges.} = am AAS bestimmt; Al³⁺ = potentiometrische Titration; Fortsetzung Tab.A.21).

saurem Ausgangsmaterial erreicht es Werte von 1:10. Ähnliches gilt für das $Mg_1 : K_1$ -Verhältnis. Da diese Unterschiede sich nicht auf die Austauscherbelegung auswirken und deren Ca-Sättigung auf allen Standorten die K-Belegung übertrifft, ist die schwache K-Versorgung der Fichten am Hohen Bogen nicht mit einem verstärkten Ca/K-Antagonismus zu erklären.

Auf saurem wie auf basischem Ausgangsgestein tritt in einigen von mir untersuchten Hochlagenböden eine auffallend hohe Na-Belegung der Austauscher sowohl in der Auflage als auch im Mineralboden auf. Dadurch liegt in allen Pedons trotz z.T. sehr niedriger Gehalte an austauschbarem Ca, Mg und K die Basensättigung relativ hoch (vgl. Tab. 3.6-3.9; Tab. A.20 -A.21). Um diesen Effekt besser hervorzuheben, wurden die V%-Werte beispielhaft für einzelne Pedons in Tab. 3.10. nur aus den Anteilen an Austausch-Ca, -Mg und -K berechnet (V1); die so hergeleitete Basensättigung (ohne Na) ist außerordentlich gering.

Die höchsten Werte mit 1.9 mmol IÄ Na/100g TB im Auflagehumus und 1.6 mmol IÄ Na/100g TB im Mineralboden (Hauptfolge) treten in Böden aus Granit auf; die Pedons aus Gneis und Amphibolit sind Na-ärmer (vgl. Tab. 3.2.-3.5.). Böden aus Granit im Südschwarzwald weisen im Vergleich zu Pedons auf Gneis ebenfalls eine deutlich erhöhte Na-Sättigung der Austauscher auf (DBG 1979).

Die hohe Na-Sättigung insbesondere der Pedons am Kohlschachten (Granit) geht mit hohen Na-Gesamtgehalten einher. Dieser Zusammenhang fordert eine extrem rasche Verwitterung Na-haltiger Silikate; Na-haltige Alkalifeldspäte sind jedoch verwitterungsresistenter als Ca-reiche (vgl. Kap. 5.3.1.). Eine Erklärung für die z.T. sehr hohe Na-Belegung der Austauschplätze in den Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes können wir im Rahmen dieser Studie nicht geben; hierfür sind weitere Untersuchungen erforderlich.

KATIONSÄUREN

An den Austauscherpositionen der Mineralbodenhorizonte dominiert überall Al^{3+} und erreicht in der Hauptfolge unabhängig vom Ausgangsgestein einen Sättigungsgrad von bis zu 95% (Abb. 3.11.). In den organischen Auflagen hingegen bleibt die Al-Sättigung zurück, wobei eine gewisse Differenzierung nach dem Muttergestein auftritt (Abb. 3.11). So sind in den Untersuchungsgebieten mit Granit und Amphibolit in den Of/Dh-Horizonten nur etwa 20%, auf Gneis dagegen etwa 40% der Austauschplätze mit Al besetzt; dafür ist in den Pedons aus Gneis die Ca-Sättigung der O-Horizonte unterlegen.

Der Anstieg der Al-Sättigung mit zunehmender Profiltiefe beruht auf der Abnahme der Gehalte an Humus, an den Ca bevorzugt gebunden ist. Im Vergleich zu älteren Untersuchungen (DBG 1975) ist die Al-Belegung der Austauscher, die als wichtiges Merkmal der Versauerung gilt, im vergangenen Jahrzehnt nicht weiter angestiegen. Diese Aussage ist allerdings

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	V(1)% (Ca, Mg, K)	V(2)% (Ca, Mg, K, Na)
Eisen- humus- podsol (Granit, II/C)	Of	3 - 1	41	47
	Oh	1 - 0	24	31
	Ae	- 4	15	33
	Bsh	- 7	7	19
	Bhs	-18	4	20
	Bsv	-27	4	30
	IICvBv	-48	4	16
	III(Bv)Cv	-94	9	23
Hanggley- Podsol (Paragneis, III/A)	Of	6.5- 2	20	22
	Oh	2 - 0	13	17
	A(e)h	- 1	6	11
	GoAhe	-10	4	19
	Bvs	-14	4	13
	Bsv	-18	4	10
	Bv	-23	3	8
	IICvBv	-35	2	3
	BvCv	-49	4	5
	(Bv)Cv	-80	10	13
maskierter Braunerde- Podsol (Paragneis, VII/C)	Of	9 - 5.5	9	10
	Oh	5.5- 0	8	9
	Aeh	- 8	4	6
	Bvhs	-14	3	5
	B(v)s	-19	3	6
	IIBv	-26	2	8
	BvCv1	-56	4	11
	BvCv2	-72	7	22
Podsol- Braunerde (Amphibolit, V/C)	Of	5.5- 2	66	70
	Oh	2 - 0	50	59
	Aeh	-12	12	15
	B(s)v	-21	7	15
	Bv	-44	4	12
	IICvBv1	-75	41	42
	CvBv2	-105	43	43
	IIICvBv	105	24	24

Tab.3.10.: Basensättigung (V%) einzelner ausgewählter Pedons unter besonderer Berücksichtigung der hohen Anteile an austauschbarem Na.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK _{eff.} /	Ca	Mg	K mmol 1A/100 g	Na 1A/100 g	Fe	Al _{ges.}	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
podsolige Braunerde (V/A)	Of	4-3	16.45	6.53	0.74	0.26	0.87	-	2.41	5.18	2.55	51.1
	Oh	3-0	13.47	3.53	0.55	0.27	0.20	-	4.25	5.57	3.20	33.8
	A(e)h	0-10	9.15	0.50	0.28	0.22	0.18	0.17	6.61	1.72	5.92	12.9
	A(e)hBv	10-16	4.89	0.24	0.12	0.11	0.20	0.06	4.70	-	4.13	13.7
	Bv	16-37	3.77	0.18	0.06	0.05	0.15	-	2.70	-	3.34	11.4
	IICvBv	37-48	3.58	0.18	0.02	0.04	0.20	-	2.50	-	3.14	12.3
Podsol- Braunerde (V/B)	Of	9-3	28.56	13.6	1.05	0.50	1.17	0.25	2.45	8.66	2.85	57.1
	Oh	3-0	33.60	12.47	0.84	0.32	0.39	0.83	6.96	13.6	4.86	41.7
	A(e)h	0-11	9.47	0.93	0.28	0.21	0.18	0.86	4.41	3.24	3.76	16.9
	B(h)sv	11-21	10.11	0.92	0.31	0.19	0.03	0.41	7.28	1.66	6.56	14.4
	Bsv	21-51	6.55	0.28	0.10	0.11	0.04	0.03	5.82	-	5.99	8.1
	IICvBv	51-76	3.53	0.07	0.01	0.04	0.05	0.01	3.44	-	3.35	4.5
	BvCv	76-90	3.90	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	3.58	-	3.75	2.9
Podsol- Braunerde (V/C)	Of	5.5-2	27.41	14.26	2.42	1.39	1.20	0.31	1.27	5.01	1.01	70.3
	Oh	2-0	11.73	5.04	0.40	0.44	1.08	n.b.	1.73	3.16	1.29	59.3
	Aeh	-12	7.78	0.55	0.21	0.16	0.28	0.43	4.85	2.13	3.94	15.4
	D(s)v	-21	5.63	0.19	0.10	0.11	0.43	-	4.58	-	4.72	14.7
	Bv	-44	3.41	0.04	0.01	0.08	0.27	-	3.06	-	3.00	11.5
	IICvBv1	-75	2.32	0.83	0.02	0.09	0.04	-	1.08	-	1.33	42.2
	CvBv2	-105	2.04	0.82	0.01	0.05	-	-	0.94	-	1.15	43.1
	IICvCv	>105	4.54	1.00	0.02	0.06	-	-	3.59	-	3.45	23.8
podsolige Braunerde (V/D)	Of	2.5-2	15.24	7.06	3.43	2.45	0.73	0.24	0.47	-	-	89.7
	Oh	2-0	24.61	7.67	1.48	0.91	0.27	1.05	8.52	6.81	6.16	41.9
	A(e)h	-2	11.10	0.83	0.32	0.18	1.18	0.76	6.34	1.85	5.97	22.7
	AhB(s)v	-7	9.01	0.44	0.20	0.14	0.05	0.24	6.58	1.66	6.28	9.2
	B(s)v	-19	6.07	0.16	0.09	0.06	0.12	-	4.90	-	5.61	7.2
	Bv	-49	3.57	0.03	0.05	0.04	0.16	-	2.32	-	3.29	7.8
	IICvBv	-66	2.92	0.04	0.02	0.03	0.20	-	1.54	-	2.63	9.8
	IICvBv1	-81	3.96	0.04	0.01	0.05	0.12	-	2.77	-	3.73	5.7
	CvBv2	-110	9.99	0.07	0.02	0.06	0.15	-	9.43	-	9.66	3.0

Tab.3.9.: Kationen-Austauschigenschaften in Pedons am Standort Hoher Roggen
(Al_{ges.} = am AAS bestimmt; Al³⁺ = potentiometrische Titration).

insofern mit Unsicherheiten behaftet, als zur Abschätzung zeitlicher Veränderungen nur Analysen von standörtlich vergleichbaren, nicht aber von denselben Pedons zur Verfügung standen.

Die hohe Al-Sättigung der Austauscher bewirkt, daß die bei der Protonenpufferung aus Al-Hydroxiden und Silikaten freigesetzten Al-Ionen in der Bodenlösung verbleiben und nach unten verlagert werden. Dort kann schon bei geringfügig höheren pH Werten ein Teil des Al wieder hydrolysieren und ausfallen (SÜSSER 1987). Das nicht gefällte Al wird mit dem Sickerwasser das Solum verlassen.

In der organischen Auflage und im humosen oberen Mineralboden treten auch Fe-Ionen an den Austauschern auf. Nach NÄTSCHER (unveröfflt.) liegt dieses Fe jedoch in II-wertiger Form vor und ist wahrscheinlich komplexiert (vgl. SCHWERTMANN et al. 1987).

Ebenso wie in den Studien von HILDEBRAND (1986) und JOCHHEIM (1985, zit. in SÜSSER 1987) fand auch ich im Auflagehumus und teilweise auch in den humusreichen Mineralbodenhorizonten austauschbaren Wasserstoff. Titrationsversuche (SÜSSER 1988) mit ökologisch vergleichbaren Böden des Fichtelgebirges (A-, B- und C-Horizonte) ergaben, daß die austauschbare Azidität weitgehend mit den Gehalten an austauschbarem Al erklärt werden kann. Im humusarmen Mineralboden werden Protonen somit gar nicht sorbiert. Wenn in O- und Ah-Horizonten dennoch austauschbarer Wasserstoff gefunden wird, handelt es sich um austauschbare Protonen an variabler Ladung organischer Säuren oder um lösliche organische Säuren selbst, die bei der Titration der Azidität miterfaßt werden (vgl. Kap. 3.2.1.); denn die Bindungsstärke des Hydronium Ions- H_3O^+ an permanenter Ladung der Tonminerale ist sehr gering. In einer Reihung der wichtigsten Kationen im Boden hinsichtlich ihrer Eintauschstärke steht H^+ zusammen mit Na ganz am unteren Ende: $Na^+ < H_3O^+ < K^+ < NH_4^+$ (mehrwertige Kationen).

3.2.7. Schwermetall-Gehalte

Für die Bodenformen am Standort Enzianfilz (VII) auf Paragneis wurden vom Bayerischen Geologischen Landesamt, Abteilung Bodenkunde, die Gesamtgehalte an Schwermetallen analysiert und für diese Studie zur Verfügung gestellt. Neben den selbst bestimmten und im Kap. 3.2.5. bereits kurz besprochenen Fe, Mn, Cu und Zn-Gesamtgehalten werden im folgenden die Gehalte von Pb, Cd, Co, Ni und Cr (Tab. A.22 im Anhang) diskutiert.

Die natürlichen Gehalte an Schwermetallen in Böden steigen mit den Gehalten an Tonmineralen und Glimmern (betrifft alle untersuchten Elemente), Schwermineralen (Cr, Ni, Co, Zn), Kalifeldspäten (Pb), Oxihydroxiden von Al, Fe und Mn (Cr, Ni, Zn, Co), seltener auch an Plagioklasen (Cu, Co) an. Zunehmende Quarzgehalte reduzieren dagegen die Schwermetallanteile ("Verdünnung"; vgl. RUPPERT 1987).

Humusauflagen und humusreiche Mineralbodenhorizonte von Waldböden eignen sich zum Nachweis eines atmosphärischen Eintrags von Schwermetallen, da die O-Horizonte eine hohe Sorptionskapazität für viele dieser Elemente besitzen. Außerdem filtert der Baumbestand Schwermetalle aus der Luft aus, wobei die Interzeptionswirkung der Fichte über jener der Buche liegt.

Für das Untersuchungsgebiet Enzianfilz liegen - abgesehen von den Auflagehumushorizonten und vom Pb im Oberboden - die ermittelten Gesamtgehalte im dem unter Berücksichtigung des Muttergesteins zu erwartenden Bereich (vgl. WEDEPOHL 1984). Die natürlichen Schwermetall-Ausstattung des Paragneis am Enzianfilz wird jeweils durch die IICvBv-Horizonte in den einzelnen Pedons repräsentiert (Abb. 3.12.). Nach TROLL und WINTER (1983) schwanken die Gehalte einiger Schwermetalle für Gneise des Bayerischen Waldes im folgenden Bereich:

-Cr	35- 110	$\mu\text{g}\times\text{g}^{-1}$
-Mn	470-1040	$\mu\text{g}\times\text{g}^{-1}$
-Ni	23- 51	$\mu\text{g}\times\text{g}^{-1}$
-Cu	10- 68	$\mu\text{g}\times\text{g}^{-1}$
-Zn	81- 120	$\mu\text{g}\times\text{g}^{-1}$

Die vom Bayerischen Geologischen Landesamt zur Verfügung gestellten Daten der Cu- und Zn-Gesamtgehalte stimmen sehr gut mit den eigenen Analysergebnissen überein (vgl. Tab. 3.4., Tab. A.19 und Tab. A.22). Dieser Diskussion sind die Daten des Bayerischen Geologischen Landesamtes zugrunde gelegt.

KUPFER

Die starke Versauerung und Podsolierung in den Hochlagenböden am

Enzianfilz hat zu Verlusten an Cu in den A-Horizonten geführt (Abb. 3.12. und Tab. A.22). Eine Abhängigkeit vom Podsolierungsgrad ist dabei nicht zu erkennen. Auch kommt es zu keiner Cu-Anreicherung in den Illuvialhorizonten der Podsole. Dagegen weisen die Auflagehumushorizonte gegenüber den A-Horizonten leicht erhöhte Cu-Gesamtgehalte auf, bedingt durch anthropogenen Eintrag und biogene Akkumulation (Abb. 3.12. und Tab. A.22.).

ZINK

Geochemisch gesehen ist Zn mit Fe und Mg vergesellschaftet und ersetzt Fe und Mg in bestimmten Positionen der Silikate und Oxide (KEILEN 1978). Der Hauptlieferant des Zn in Paragneisen ist wie für Kupfer der leicht verwitterbare Biotit. Nach RUPPERT (1987) ist in den humusreichen oberen Horizonten von Waldböden mit einer anthropogenen Zunahme von $22 \mu\text{g x g}^{-1}$ Zn über die natürlichen Gehalte hinaus zu rechnen. Nach FIEDLER und REISSIG (1964, zit. in KEILEN 1978) beruhen die hohen Zn-Gehalte in den Auflagehumushorizonten aber auch auf starken Einbeziehung des Zn in den biogenen Kreislauf sowie auf der festen Bindung des Zn in stabilen und wenig beweglichen, organischen Zn-Komplexen. Am einzelnen Pedon ist gewöhnlich nicht auseinander zu halten, ob die im Vergleich zum Mineralboden erhöhten Zn-Gehalte in der Auflage (Abb. 3.12. und Tab. A.22.) biogen oder anthropogen akkumuliert sind.

Die Zn-Gesamtgehalte in den A-Horizonten der Pedons am Enzianfilz variieren stark von ca. $18 \mu\text{g x g}^{-1}$ (Ahe-Horizont VII/B) bis $35 \mu\text{g x g}^{-1}$ (Aeh, Pedon VII/A; Tab. A.22) in Abhängigkeit vom Humusgehalt. Relativ hohe Gehalte werden angesichts der intensiven Verwitterung und Verlagerung des Zn in den stark sauren Oberhorizonten dieser Hochlagenböden nur dort erreicht, wo hohe Anteile an Huminstoffen eine wirksame Komplexierung und Festlegung des Zn ermöglichen.

Unter den vorliegenden pH- und Eh-Bedingungen besitzt Zink eine ähnliche Mobilität wie Mangan; beide Elemente sind deshalb durch die Podsolierungsvorgänge tief in den Unterboden verfrachtet (vgl. Abb. 3.12. und Tab. A.22.).

BLEI

Pb ersetzt K in seinen Mineralen: Der Pb-Gehalt der Kalifeldspäte liegt mit ca. $53 \mu\text{g x g}^{-1}$ über jenem von Muskovit (26) und Biotit (21). Durch Verwitterungsvorgänge mobilisiertes Pb wird sowohl an organische Stoffe als auch an Tonminerale und Fe-Oxide fest gebunden. Die Hauptquellen anthropogener Anreicherung von Pb in Böden und Pflanzen sind die Kfz-Abgase und die bleiverarbeitende Industrie.

In Südbayern liegt die weiträumige, typische anthropogene Belastung mit Pb in den Auflagehumushorizonten der Waldböden bei $60 \mu\text{g x g}^{-1}$ (RUPPERT 1987). Im Inneren Bayerischen Wald sollten die Gehalte an anthropogenem Blei ebenfalls in diesem Bereich liegen, da die geringe

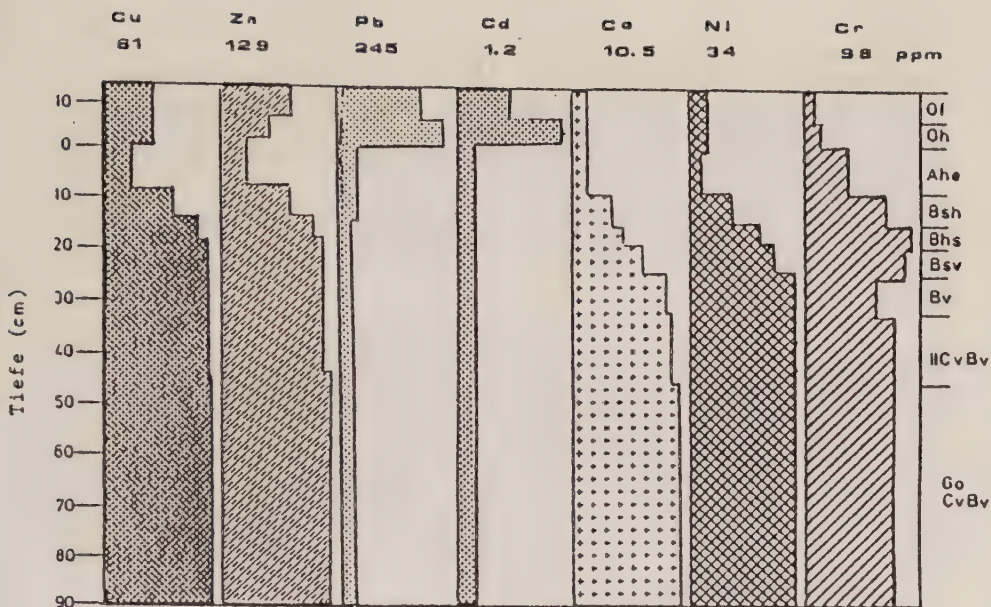


Abb.3.12.: Verteilung der Schwermetalle in einem Eisenhumuspodsol am Standort Enzianfilz (VII/B). Die oben eingetragenen Gehalte entsprechen den Maximalwerten des jeweiligen Elementes.

Emission aus Kfz bei nur schwachem Verkehr durch die örtliche bleiverarbeitende Glasindustrie kompensiert wird. So sind die hohen Pb-Gesamtgehalte der O-Horizonte aller Pedons am Enzianfilz vermutlich u.a. auf die starke Belastung durch lokale Emittenten zurückzuführen. Die A-Horizonte enthalten mit durchschnittlich $55 \mu\text{g/g}$ viel mehr Pb als die Unterböden (z.B. IICvBv; vgl. Abb.3.12.). Zu den exakt gleichen Differenzen kommt RUPPERT (1987) aufgrund zahlreicher Untersuchungen in bayerischen Waldböden. Diese Anreicherung von zusätzlichem $21 \mu\text{g/g}$ Pb im Oberboden entspricht 8.4 kg/ha anthropogenem Pb.

Diese hohen Gehalte in der Auflage und in den humusreichen Horizonten weisen darauf hin, daß ein großer Teil des durch Immissionen eingebrachten Pb im Boden fixiert wurde und daß das Sorptionsvermögen der Hochlagenböden für Pb vermutlich noch nicht erschöpft ist. STAHR et al. (1980) fanden im Schwarzwald ebenfalls eine Anreicherung von Pb im humosen Oberboden, aber auch einen erhöhten Umsatz von Pb (Cd und Cu).

CADMIUM

Cd ist als chalkophiles Element bevorzugt in magmatischen Sulfiden (Sphalerit) akkumuliert, daneben aber auch in Mn-Oxiden und im Limonit. In den hier untersuchten Böden liegt Cd primär im Biotit und in Mn-Oxiden gebunden vor.

Hauptquellen der Cd-Emission sind Kfz-Verkehr und die Cd-verarbeitende Industrie (Korrosionsschutz für Fe und Stahl). Auch Heizöl hat mit $0.53 \mu\text{g/g}^{-1}$ einen hohen Cd-Gehalt (LAGERWERFT et al. 1970, zit. in KEILEN 1978).

Für Südbayern liegt die weiträumig typische Belastung der Oberböden mit Cd bei $0.5 \mu\text{g/g}^{-1}$ (RUPPERT 1987). Zieht man diesen Wert von den Cd-Gesamtgehalten der Auflagehumushorizonte am Standort Enzianfilz ab, so zeigt sich immer noch eine Anreicherung in der organischen Auflage von $0.4-1.5 \mu\text{g/g}^{-1}$ Cd (vgl. Tab.A.22 und Abb.3.12.). Sie ist wahrscheinlich das Ergebnis einer hohen Deposition als Folge der großen Niederschläge in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes; eine gewisse biogene Akkumulation kann jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden.

Cd verhält sich insofern ähnlich wie Pb, als es in den humosen Oberbodenhorizonten ganz ausgeprägt akkumuliert wird. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß ein Teil des prinzipiell recht beweglichen (anthropogenen) Cd den Boden passiert.

Eine erhebliche Mobilisierung von Cd, Co, Ni, Pb und Zn aus kontaminierten Böden wurde im Harz durch Analyse saurer Quellwässer aus schwermetallarmen Quarziten festgestellt (HEINRICHS et al. 1986). SCHAAF (1985, zit. in HANTSCHER 1987) fand im Fichtelgebirge in Sickerwässern aus den unteren Horizonten von Granit- und Phyllitböden ebenfalls Cd-Konzentrationen, die deutlich über dem Toleranzwert für Trinkwasser von $6 \mu\text{g/l}$ liegen.

KOBALT

Co liegt im Biotit und Orthoklas gebunden vor. Si-reiche Minerale sind insgesamt Co-arm. Bei intensiver Verwitterung wird Co zusammen mit Mn leicht aus dem Boden ausgewaschen. Demzufolge steigen die Co-Gehalte der podsolierten Böden am Standort Enzianfilz mit der Profiltiefe an (Abb.3.12.).

Im Gegensatz zu Cu, Zn, Cd und Pb ist Co als sehr mobiles Element nicht oder nur sehr schwach in der organischen Auflage angereichert (VII/C, D, E, Tab.A.22. und Abb.3.12.). Nach RUPPERT (1987) überwiegt der Austrag von Co durch Sickerwässer den atmosphärischen Eintrag bei weitem (negative Bilanz).

NICKEL

Ni-haltige Minerale sind Ni-Sulfide (Pentlandit, Millerit); daneben ist es in Pyroxenen, Olivinen, Serpentin und Biotiten enthalten. Ni-Emissionen entstehen bei der Verbrennung von Öl und Benzin. Die Ni-Gehalte steigen ähnlich wie die Co-Gehalte in den Pedons mit zunehmender Bodentiefe an (Abb.3.12.). In den stark sauren und in den oberen humusreichen Mineralhorizonten der Hochlagenböden verläßt Ni infolge seiner hohen Mobilität das Solum; ein erheblicher Austrag mit dem Sickerwasser ist zu erwarten.

CHROM

Die wichtigsten Cr-Minerale sind der Chromit (FeOCr_2O_3) und der Krokot (PbCrO_2). Auch in Amphibolen, Pyroxenen und Biotiten ist Chrom enthalten. Cr wird bei der Verbrennung von Kohle und Öl emittiert.

Wie Ni hat auch Cr keine pflanzenphysiologische Bedeutung. Cr(III) kommt in Böden bei pH-Werten <4.5 als $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ -Ion vor und wird als dreiwertiges Kation sehr stark adsorbiert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984). Die Analyseergebnisse sprechen jedoch bereits für einen Cr-Verlust im Oberboden, wie er für die stark sauren Verhältnisse (pH 3.9-4.1) zu erwarten ist (Tab.A.22. und Abb.3.12.)

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die starke Versauerung und Podsolierung in den Hochlagenböden am Enzianfilz zu Verlusten an Co, Ni und Cr, aber auch an Cu und Zn geführt hat, wobei bodenbürtige und depositionsbedingte Anteile in die Verlagerung miteinbezogen werden. Demgegenüber kommt es trotz gewisser möglicher Verluste für Pb und Cd zu einer ausgeprägten, wohl überwiegend depositionsbedingten Akkumulation im Auflagehumus. Auch die gegenüber den Ah-Horizonten erhöhten Gehalte an Cu und Zn in der organischen Auflage sprechen für eine Kontamination durch Cu- und Zn-Immission.

4. Diskussion der Freiland- und Laborergebnisse

4.1. Bodenentwicklung und Bodenformen

Die bodenkundliche Inventur der Hochlagenböden im Inneren Bayerischen Wald wurde durch eine großmaßstäbliche Kartierung mehrerer Gipfel-Kleinlandschaften mit verschiedenartigem Ausgangsgestein (Granit, Paragneis und Amphibolit) eingeleitet. Das Verteilungsmuster der Bodenformen erwies sich dabei zum einen durch den Gesteinstyp, die Höhenlage, die Klimaverhältnisse und das Relief vorbestimmt; zum anderen wird es durch die Mächtigkeit der locker gelagerten Hauptfolge über der verfestigten Basisfolge und die dadurch vorgegebene Menge, Fließrichtung und Geschwindigkeit des Sickerwasser-Abflusses geprägt. Der verschiedenartige Silikatbestand der vorkommenden Gesteine wirkt sich dagegen nur schwach aus.

Die chaotisch und locker gelagerte Hauptfolge entspricht dem periglazialen Auftaubereich. Sie kann stellenweise einen erhöhten Schluffanteil aus Flugstaub-Einwehungen enthalten; ihr gegenüber der unterlagernden Basisfolge erhöhter Tonanteil ist auf kryoturbate Vorgänge und holozäne Verwitterung zurückzuführen. In der dichten Basisfolge kam es durch laminares Fließen und/oder Translationsvorgänge entlang von Eislinen zu einer hangparallelen Skeletteinregelung und zur Ausbildung eines plattigen Gefüges. Frosthieb der Steine über wachsenden Eislinen führte zum Aufpressen von Schluffhäutchen auf die Oberseite der Steine. Diese periglaziale Strukturierung der Basisfolge wurde durch langanhaltenden Permafrost konserviert.

Die Hauptfolge ist in den Plateau- und Sattellagen besonders geringmächtig (20-30 cm), bedingt wahrscheinlich durch ein nur flaches Auftauen und Gefrieren des Bodens in situ. An den flachen Hängen kam es dagegen v.a. in Süd- und West-Exposition, infolge höherer Einstrahlung vermutlich zu einem tieferen Auftauen des Oberbodens, zu tieferreichender Kryoturbation und zu intensiveren solifluktiven Verlagerungsvorgängen mit dem Ergebnis, daß die Hauptfolge mächtiger ist (30-40 cm).

Die Überprüfung der vertikalen Differenzierung des pleistozänen Schichtpaketes anhand quantitativer Schichtungsparameter bestätigte für 14 der 18 untersuchten Bodenprofile die bereits im Gelände ausgeschiedene Schichtgrenze 1. Ordnung zwischen Haupt- und Basisfolge. Bei zwei der übrigen Profile (V/C und V/D) beweisen die tonmineralogischen Untersuchungsergebnisse die Schichtung dieser Pedons. Bei den anderen beiden Profilen (III/E und V/A) erwies sich die Feinerdekörnung als völlig inhomogen, da durch den Skelettreichtum dieser Pedons die Probenahme auf die "Zwickelfüllungen" beschränkt werden mußte.

In den Plateau- und Sattellagen bilden sich infolge einer lang anhaltenden Naßkalt-Phase im Frühsommer mächtige Rohhumusdecken, bedingt durch das späte Abschmelzen des Schnees und des bei nur flacher Neigung behinderten Abfließens der Schmelz- und Sickerwässer.

Die durch hohe Niederschläge (ca. 1800mm/a) gespeisten, großen Sickerwassermengen laden sich beim Passieren der Auflagehorizonte mit niedermolekularen, wasserlöslichen Säuren auf, die im mineralischen Oberboden aktiv bleiben und z.T. metallorganische, mobile Komplexe bilden. Diese Chelate, zusammen mit Sesquioxidsolen und ionarem Fe, Al und Mn werden in dem auf die Gipfel-Verebrungen beschränkten, primär größeren Bodenmaterial (lehmiger Sand) v.a. vertikal in den Unterboden verlagert. Deshalb entwickelten sich in den Plateau- und Sattellagen hauptsächlich typische flachgründige Hochlagenpodsole.

Im zentralen Bereich ausgedehnter Plateaus hingegen entstanden infolge eines hier noch stärker behinderten Abflusses über geringmächtiger Haupt- und dichter Basisfolge Moore (Filze). Zwischen diesen und den Hochlagen-Podsolen vermitteln stellenweise Gley-Podsole.

In den an die Gipfel-Verebrungen anschließenden, flachen oberen Hanglagen ist die Intensität der Podsolierung schwächer. Dies ist zum einen durch die i.a. in der Hauptfolge feinere Bodenart (sandiger Lehm) zu erklären; zum anderen sind in den Hanglagen die Bodentemperatur- und Wasserverhältnisse günstiger, da hier der Schnee im Frühjahr schneller ausapert und das Schmelzwasser ungehindert abfließen kann. Damit ist die Mineralisierung und die Einarbeitung organischer Stoffe in den Mineralboden begünstigt; so entsteht geringer mächtiger Rohhumus, dessen engen C/N- und C/P-Verhältnisse niedriger sind, als man für derartig extreme Standorte erwarten würde. Unserer Meinung nach liegt in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes ein feinhumusreicher, lockerer und biologisch aktiver Rohhumus vor.

Entsprechend den günstigeren Abfluß- und Klimaverhältnissen finden sich an den flach geneigten, meist Süd- und West-exponierten Hängen in den Hochlagen auf saurem Ausgangsgestein Braunerde-Podsole und Podsol-Braunerden mit geringerer Differenzierung in Fe-Gehalten zwischen Eluvial- und Illuvialhorizonten. Stellenweise bildeten sich anstelle typischer Braunerde-Podsole Böden aus, deren Verarmungshorizonte durch hohe Humusgehalte maskiert sind. Dementsprechend wurde diese Varietät als maskierter Braunerde-Podsol bezeichnet.

Auf ultrabasischem Gestein kommen dagegen in ca. 1000 m Höhe podsolige Braunerden und Podsol-Braunerden vor.

Die deutlichen Unterschiede in der Verlagerung des pedogenen Fe (Fe_d) führte - in Anlehnung an BLUME und SCHWERTMANN (1964) - zum Vorschlag neuer Abgrenzungskriterien zwischen den vorgefundenen Bodenformen. Bei fehlender bzw. sehr schwacher Fe-Verlagerung (Differenz Ae/Bs < 5%) wurden (podsolige) Braunerden ausgeschieden; in der Podsol-Braunerde liegt der Anstieg der Gehalte an pedogenem Fe vom Eluvial- zum Illuvialbereich zwischen 5-30%. Die Grenze zwischen Braunerden und Podsolen liegt somit bei 30% Fe_d -Gehaltsdifferenz. Innerhalb der Gruppe der Podsole sind die Braunerde-Podsole durch eine Zunahme des Gehaltes an pedogenem Fe zwischen 30 und 100%, die typischen Hochlagen-Podsole durch einen solchen von über 100% gekennzeichnet. Ein weiteres Abgrenzungskriterium der Hochlagenpodsole gegenüber dem Subtyp

Braunerde-Podsol zeigt sich in der Ausbildung eines Bh-Horizontes infolge Einspülung von Huminstoffen. Unter diesem folgt ein rostbrauner Bs-Horizont, so daß diese Podsole als Eisenhumuspodsole ausgeschieden wurden (vgl. REHFUESS 1981).

4.2. Bodenphysikalische und chemische Eigenschaften der Hochlagenböden

Die Ergebnisse der Korngrößenanalyse zeigen, daß in der Hauptfolge die Tongehalte i.d.R. höher liegen als in der unterlagernden Basisfolge. Ausnahmen bilden die Hauptfolgen der Gipfel-Verebnungen und Sattellagen, deren sandiges Substrat die Podsolierung begünstigt. Die überlegenen Tongehalte der Hauptfolge sind einerseits auf verstärkte Kricklastik im Periglazial, zum anderen auf Verwitterung der primären Silikate während der holozänen Pedogenese zurückzuführen. Aus der Änderung des Tonmineralbestandes (vgl. Kap.5.3.2.) und dem Rückgang des Tongehaltes an der Schichtgrenze zwischen Haupt- und Basisfolge sind intensive, holozäne Verwitterungsvorgänge abzuleiten. Diese sind jedoch, wie die gesamten Vorgänge der Pedogenese, auf die locker gelagerte Hauptfolge beschränkt.

Der pH-Wert der Böden ist in drei von vier Untersuchungsgebieten recht einheitlich; er liegt in den A-Horizonten der Pedons aus Granit und Gneisen i.d.R. > 4.2 (H_2O ; pH $CaCl_2$) 3.5) und steigt an der Basis der Hauptfolge auf Werte um 5 an. Nur am Hohen Bogen auf ultrabasischem Ausgangsgestein sinken die pH-Werte trotz hoher Ca- und Mg-Gesamtgehalte in der Feinerde in den obersten Mineralbodenhorizonten auf 3.6 (H_2O) bzw. $3.0-3.2$ ($CaCl_2$). Auch die Basisfolge am Hohen Bogen ist mit pH(H_2O)-Werten zwischen 4.5 und 4.8 (pH- $CaCl_2$ zwischen 4.0 und 4.3) saurer als auf den anderen Standorten. Diese tiefe Versauerung, die nicht nur auf den Oberboden beschränkt ist, spricht für den bedeutenden Einfluß der intensiven Verwitterung des Gesteins im Tertiär (s.u.).

Entsprechend dem unterschiedlichen Ausgangsgestein differieren die Gesamtgehalte einiger Bioelemente deutlich zwischen den einzelnen Standorten. Der dunkle Amphibolit ist gegenüber dem hellen Granit und den glimmer- und quarzreichen Paragneisen ein kieselsäureärmeres, feinkörniges Gestein, das hohe Gehalte an Fe- und Mg-reichen Hornblenden und Ca-reichen Plagioklassen aufweist. Deshalb sind die Ca-, Mg-, Mn- und Fe-Gehalte im Vergleich zu Böden aus kieselsäurereichem Granit und Paragneis deutlich erhöht, die K- und Na-Gesamtgehalte hingegen niedriger. Bzgl. der Al-Gesamtgehalte unterscheiden sich die Böden der verschiedenen Standorte nicht.

Im Gegensatz zu den lithogenen Unterschieden in den Gesamtgehalten der Böden an Ca, Mg, Na und K (Fe) differieren die Kationen-Austausch-eigenschaften der Hochlagenböden im Inneren Bayerischen Wald nur wenig. Trotz deutlich höherer Tonanteile der Feinerde auf Amphibolit verglichen mit den Granit- und Paragneisstandorten erreicht die KAK eff. bei ähnlichen Humusgehalten auch hier nur Werte $< 10 \text{ mmol IA} / 100 \text{ g TK}$. Dieser geringe Wert beruht einerseits auf dem tiefen pH-Wert,

andererseits auf der Dominanz des Kaolinit in der Tonfraktion; er besitzt gegenüber den Dreischichttonmineralen eine erheblich geringere Kationenaustauschkapazität. Da der Kaolinit auch in der von pedogenetischen Prozessen noch weitgehend unbeeinflussten Basisfolge vorherrscht, muß es bereits vor oder während der Bildung der periglazialen Deckschichten zu einer intensiven Verwitterung und Abfuhr von Si, Alkali- und Erdalkalitionen gekommen sein. Demnach wich vermutlich der bodenchemische Zustand der Pedons am Hohen Bogen zu Beginn der holozänen Bodenentwicklung nicht erheblich ab von jenen Böden aus saurem Muttergestein.

In der humusführenden und durchwurzelten Hauptfolge variiert die Al-Sättigung unabhängig vom Ausgangsgestein gewöhnlich zwischen 75 und 80%. Die Mg-Sättigung der Austauscher in den A-Horizonten schwankt zwischen 1 - 2 (Granit und Paragneis) und 3% (Amphibolit). Die etwas bessere Mg- und Ca-Ausstattung der Böden aus ultrabasischem Gestein spiegelt sich auch in der Basensättigung (ohne Berücksichtigung des austauschbaren Na) der O-Horizonte wieder, die hier 50% überschreitet, während sie in Granit-Pedons nur 24-45% und auf Paragneis nur rund 20% beträgt. Die hohe Al-Sättigung bewirkt eine geringe relative Eintauschstärke der Mg- und Ca-Ionen aus der Bodenlösung an die Austauscher, d.h. niedrige Gapon-Koeffizienten der Ionenpaare Mg^{2+}/Al^{3+} und Ca^{2+}/Al^{3+} . Die Speicherefähigkeit des Bodens für Mg-Ionen und die Vorräte an austauschbarem Mg sind also gering.

Schwermetallanalysen am Standort Enzianfilz zeigen, daß die durch Immissionen zugeführten Pb- und Cd-Mengen noch weitgehend im Auflagehumus an organische Stoffe gebunden vorliegen. Toxische Gehalte dieser Elemente wie auch von Cu, Zn usw. sind nicht wahrscheinlich. Die Gefahr einer verstärkten Mobilisierung von Schwermetallen durch Kalkung (vgl. SCHIERL et al. 1986) sowie einer Auswaschung von Nitrat durch raschere Mineralisierung und Nitrifikation muß bei Entscheidungen über Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen zur Beseitigung des Mg-Mangels berücksichtigt werden.

5. Silikatbestand- und Verwitterung

5.1. Verwitterung und Pufferung

Die Freisetzung von Na, K, Ca, Mg, Al und Fe aus primären Silikaten durch Verwitterung unter Protonenverbrauch ist ein für den Bioclementhaushalt von Waldökosystemen wichtiger Prozeß. Durch die Silikatverwitterung können z.B. die durch Biomasseernte oder Auswaschung entzogenen Nährstoffkationen wieder ersetzt und gleichzeitig sowohl ökosystemintern erzeugte oder von außen eingetragene Säuren neutralisiert werden. Die Rate der Silikatverwitterung entscheidet damit unter bestimmten Randbedingungen über den chemischen Bodenzustand und seine weiteren Veränderungen in der Zukunft.

Nach den Ergebnissen der bodenchemischen Inventur besitzen alle Böden in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes, unabhängig von Muttergestein und Bodentyp im Mineralboden eine geringe Basen- und eine hohe Al-Sättigung. Die Morphologie des Geländes, die Bodenart und die Mächtigkeit der lockeren Hauptfolge bestimmen in erster Linie über die Podsolierungsintensität und auch über die Perkolations des Sickerwassers und die damit verbundenen Auswaschungsvorgänge.

Die schlechte Ernährung der Hochlagenfichten mit Ca und Mg auf allen Bodenformen und die Dominanz von Al an den Austauscheroberflächen bei i. d. R. niedrigen Boden-pH-Werten ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})=3.5-4.8$) im durchwurzelten Bereich deuten auf eine generell begrenzte Verwitterungsrate hin. Dies ist erstaunlich, denn angesichts großer Unterschiede im Silikatbestand der Ausgangsgesteine sollte man eigentlich mit einer größeren Differenzierung der Verwitterungsrate, der Nachlieferung von Basen-Kationen und der Vorräte bzw. Sättigungen von austauschbarem Ca und Mg rechnen.

ULRICH et al. (1979) haben erstmals die Protonen-Pufferreaktionen systematisch gegliedert und sie jeweils bestimmten Pufferbereichen (Carbonat-, Silikat-, Austauscher- und Al/Fe -Pufferbereich) zugeordnet. Die von dieser Arbeitsgruppe gewählte Nomenklatur berücksichtigt sowohl die Natur der Pufferreaktionen als auch vermutete ökologische Folgen (ULRICH 1981).

Nach ULRICH (1985) ist die Umbildung primärer Silikate die vorherrschende Pufferreaktion in carbonatfreien Böden mit $\text{pH} > 5$, wobei Tonminerale mit permanentem negativen Ladungsüberschuß entstehen. Bei der Pufferung durch Silikatverwitterung wird kinetisch stabile Säureneutralisationskapazität (SNK=Differenz zwischen Äquivalenten an konservativen Kationen und Äquivalenten an konservativen Anionen) in kinetisch labile, reaktionsfähige SNK umgebaut. Dies bedeutet u.U. größere Vorräte an austauschbar gebundenen Nährstoff-Kationen und entsprechend günstigere Versorgungsmöglichkeiten für die Bestockung.

In den untersuchten Hochlagenböden liegen die pH-Werte im durchwurzelten Bereich der locker gelagerten Hauptfolge deutlich unterhalb $\text{pH}=5$, so daß entsprechend dem ULRICHschen Einteilungssystem die Rate der Al-

Freisetzung aus den Silikatgittern (der primär vorhandenen Silikate und der pedogen gebildeten Tonminerale) ansteigt; bei $\text{pH}=4.5-5$ dominiert die Bildung polymerer Al-Hydroxykationen. Sie verdrängen Basenkationen und blockieren im Zwischenschichtraum aufgeweiteter Dreischichtminerale permanenten negativen Ladungsüberschuß, so daß die Kationen-Austauschkapazität abnimmt. Bis $\text{pH}=4.2$ erfolgt eine Akkumulation an austauschbarem Al^{3+} (Austauscher-Pufferbereich), wie es auch bei den hier untersuchten Hochlagenböden der Fall ist (Kap.3.2.6.). Zur "Austauscherpufferung" ist anzumerken, daß dies nur dann eine wirkliche Pufferung ist, wenn die Reaktion über den Austausch sorbierter Kationen durch Protonen abläuft. ULRICH et al. (1979) versteht hierunter jedoch vor allem den Austausch von Alkali- und Erdalkalitionen durch Al. Das Al wurde zuvor durch Protonen aus Tonmineralen oder Hydroxiden freigesetzt. Dabei hat die eigentliche Pufferreaktion stattgefunden (SÜSSER 1987).

SCHWERTMANN et al. (1987) schlugen eine Modifikation des ULRICHschen Systems vor, wobei sie sich bei ihrer Einteilung strikt an die Art des Protonenakzeptors halten. Sie betonen, das Ausmaß und die Art der Pufferung seien vor allem durch die Menge und die Säurestärke der Bodenpuffersubstanzen bestimmt. Somit kann der pH-Bereich, in dem eine Puffersubstanz wirkt, nur dann definiert werden, wenn man deren Säurestärke kennt. Diese ist jedoch für die festen Protonenakzeptoren nur lückenhaft bekannt. Nach SCHWERTMANN et al. (1987) ist der pH-Bereich der Silikatpufferung deshalb nur schwer abzugrenzen; generell erscheint ihnen die strikte Bindung an bestimmte pH-Bereiche problematisch. Nach ihrer Einteilung ist Silikatpufferung in der gesamten pH-Spanne $\text{pH}<7$ wirksam, solange Silikate im Boden vorhanden sind. Auch die Pufferung über Tonminerale ohne und mit permanenter Ladung fällt nach SCHWERTMANN et al. (1987) noch in den Silikat-Pufferbereich, während ULRICH (1979 und 1985) sie schon in den Bereich der Austausch-Pufferung stellt.

In der SCHWERTMANNschen Einteilung ist die Kinetik der Pufferreaktionen nicht berücksichtigt. Die Pufferrate kann jedoch z.B. bei der Silikatpufferung in weitem Rahmen variieren; andere Reaktionen, z.B. jene an pH-abhängigen Ladungen laufen vermutlich in einem engeren pH-Bereich und relativ schnell ab. SÜSSER (1987) konnte nachweisen, daß die sehr große Pufferkapazität von Silikaten in Böden auf Granit und Phyllit wegen der langsamen Reaktionsrate vermutlich kaum zur Neutralisation von Säuren beiträgt. Dagegen bestimmt wegen der großen Reaktivität die im Vergleich dazu kleine Pufferkapazität an Al-Hydroxyverbindungen das Pufferverhalten dieser Böden.

Auch bei den Untersuchungen von VAN BREEMEN und WIELEMAKER (1974 a und b) bleiben kinetische Gesichtspunkte außer Betracht. Sie machten wahrscheinlich, daß der pH-Wert der Böden in der Tat von ihrem Mineralbestand bestimmt wird, langfristig also mit ihm im Gleichgewicht steht. Aus den von ihnen berechneten Pufferkapazitäten verschiedener Silikate läßt sich ablesen, daß die einzelnen Silikate bei einem CO_2 -Partialdruck von 10^{-4} atm. (Durchschnittswert für Boden 10^{-3} atm.) eine Pufferkapazität von $0.1 \text{ Äquiv. L}^{-1}$ bei folgenden pH-Werten aufweisen: Kaolinit 2.9, Smectit 3.6, Allophan 4.3, Mikroklin 4.5, Illit 5.8 und

7.3, Chlorit und Albit 8.3. In einem Mineralgemisch hat jene Mineralphase, welche die höchste Pufferkapazität besitzt, einen dominierenden Einfluß auf die Pufferintensität und den pH-Wert des ganzen Systems. In humusreichen Oberböden, wie sie in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes vorkommen, messen VAN BREEMEN und WIELEMAKER (1974) den organischen Stoffen eine bedeutende Rolle für die pH-Pufferung durch die Bildung metall-organischer Komplexe und durch Protonierung (vgl. SCHWERTMANN et al. 1987) bei.

Auch nach MATZNER (1987) ist für den Einfluß der Silikatverwitterung auf den Stoffhaushalt eines Ökosystems weniger die im Boden vorhandene Menge an Silikaten von Bedeutung als vielmehr deren Verwitterungsrate. Diese war in jüngster Zeit Ziel vielfältiger Forschungsarbeiten. Trotzdem ist der gegenwärtige Kenntnisstand über die Raten der Silikatverwitterung und ihre Abhängigkeit von Standortsfaktoren noch immer unzureichend.

Im folgenden sind einige einschlägige, methodische Forschungsansätze aufgeführt:

- a) Zur Frage der kurzfristigen Reaktionstechnik in Abhängigkeit von verschiedenen Reaktionsbedingungen wurden monomineralische Kornfraktionen untersucht (SCHNITZER und KODOMA 1976; CHOU und WOLLAST 1984/1985; SCHOTT et al. 1980; MANLEY und EVANS 1986; SCHOTT und PETIT 1987). Da die Verwitterungsraten nach Laborergebnissen i.d.R. die in Feldstudien (Input-Output-Bilanzen) ermittelten Daten weit übertreffen, sind diese Untersuchungsergebnisse nur begrenzt auf das Freiland übertragbar.
- b) Der z.Zt. am weitesten verbreitete Ansatz zur Erfassung aktueller Raten der Silikatverwitterung ist die Auswertung von Input-Output-Bilanzen definierter Wassereinzugsgebiete (JOHNSON et al. 1981; CLAYTON 1983/86; FÖLSTER 1985; PACES 1986). Die Quantifizierung der Verwitterungsraten basiert allerdings auf Voraussetzungen, die i.d.R. höchstens unvollkommen eingehalten sind (vgl. CLAYTON 1983):
 - Im Meßzeitraum darf keine Veränderung im System erfolgen; so darf sich z.B. die Nähraufnahme der Pflanzen nicht ändern;
 - es müssen ausreichende Informationen über die Böden bereitstehen sowie über deren Gehalte an organischen Stoffen, da diese ebenfalls als Quelle für freizusetzende Kationen in Frage kommen;
 - schließlich muß man die Flußraten des Sickerwassers für die Böden lagenweise auflösen können.

Diese Voraussetzungen sind nirgendwo vollständig erfüllt, so daß über eine Input-Output-Bilanzierung ebenfalls nur eine ungefähre Schätzung der Silikatverwitterungsrate möglich ist.

- c) Ein dritter Forschungsansatz zur Erfassung silikatischer Verwitterungsraten ist die Bilanzierung von Mineralvorräten in Profilen (BOSSÉ 1964; STAHR 1979; MAZZARINO 1981; MAZZARINO et al. 1983). Dabei vergleicht man die rezenten Vorräte an Silikaten oder Elementen in den pedogenetisch beeinflussten A- und B-Horizonten (So-

lum) mit dem Gehalt zu Beginn der Bodenbildung (C-Horizont). Eine solche Untersuchung setzt Homogenität des Ausgangsmaterials voraus (BARSHAD 1964), die jedoch selten vorliegt. Um die Frage einer in den letzten Jahrzehnten verstärkten Einwirkung saurer, atmogener Deposition zu klären, wäre eine zeitliche Auflösung der Verwitterungsvorgänge notwendig; diese ist mit einer Bilanzierung für die gesamte holozäne Bodenbildungszeit nicht möglich.

Entsprechend den unterschiedlichen Forschungsansätzen sind auch die Ergebnisse nur bedingt miteinander vergleichbar. Für saure Waldböden in Deutschland liegen folgende Abschätzungen der Protonenkonsumtion für die Freisetzung von Alkali- und Erdalkalimetalle aus Silikaten vor (aus MATZNER 1987):

BOSSE (1964)	0.2 kmol ha ⁻¹ a ⁻¹
STAHR (1979)	0.2-3.2 kmol ha ⁻¹ a ⁻¹
MAZZARINO (1981)	0.4-1.1 kmol ha ⁻¹ a ⁻¹
FÖLSTER (1985)	0.2-1.1 kmol ha ⁻¹ a ⁻¹

Die verschiedenartigen Ergebnisse beruhen u.a. auch darauf, daß verschieden tief entwickelten Pedons untersucht wurden.

S.2. Eigener Forschungsansatz

Ergänzend zu der umfassenden bodenchemischen Inventur und Beschreibung der Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes erschien es notwendig, auch eine Bestandsaufnahme der im Boden vorhandenen Silikate durchzuführen. Mit dieser mineralogischen Kennzeichnung wird versucht, das Potential der "nachschaffenden Kraft" der Silikatverwitterung in diesen basenarmen und Al-gesättigten Böden abzuschätzen. Vorstellungen darüber sind nötig, um die Versorgungsmöglichkeiten der Bestockung mit Basenkationen und die Pufferungskapazitäten durch diesen Vorgang zu bewerten. Gleichzeitig sollen über die Verteilung der Silikate die Verwitterungstiefe- und intensität sowie die Homogenität des Ausgangsmaterials beurteilt werden.

Ausgehend von den Kenntnissen über den Mineralbestand in verschiedenen Kornfraktionen führte ich außerdem zum Erfassen der Nährstofffreisetzung durch Verwitterung in verschieden stark podsolienten Böden aus unterschiedlichem Gestein (Granit, Paragneis, Glimmerschiefer/Paragneis und Amphibolit) ein chemisches Experiment durch. Dabei wird mittels eines sequentiellen Batch-Versuches die Freisetzung von Metallkationen durch Verwitterung unter möglichst realistischen Bedingungen simuliert.

5.2.1. Material und Methodik

5.2.1.1. Mineralogische Untersuchungen

Die mineralogischen Untersuchungen wurden an typischen Pedons der Bodeninventur durchgeführt. Als für die Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes repräsentative Subtypen wurden Podsol-Braunerden, Braunerde-Podsole, Podsole, Hanggley-Podsole am Rachel (Paragneis: vergilbter Fichtenbestand), Lusen (Granit: vergilbter Bestand), Lackenberg (Glimmerschiefer/Paragneis: vergilbter Bestand) und Hoher Bogen (Amphibolit: gesunder Alt- und vergilbter Jungbestand) ausgewählt (vgl. Abb. 2.1.). Der Bereich des Hohen Bogen stellt zwar in dem vorwiegend aus Gneisen und Graniten aufgebauten Mittelgebirge des Bayerischen Waldes eine Besonderheit dar. Da jedoch auch auf diesem an Amphibolen und Plagioklasen reichen ultrabasischen Gestein, das durch Verwitterung genügend Ca und Mg nachliefern sollte, Mg-Mangelvergilbung der Fichten zu beobachten ist, wurde die dort verbreitete Bodenform in die Untersuchungen aufgenommen.

Für das Einbeziehen zweier Bodenformen aus den Kartiergebieten am Lusen und am Lackenberg, die von einem Kollegen (FÖRSTER 1988) bearbeitet wurden, sprechen folgende Gründe: Der Granitstock des Lusen wurde schon mehrfach mineralogisch untersucht (DEG 1975; BAUERGER 1977; DILL et al. 1980), so daß Vergleichsdaten für die eigenen Untersuchungen vorlagen. Der Standort am Lackenberg wurde wegen seiner Charakterisierung als Glimmerschiefer in der Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (1981) als zusätzliche Gesteinsvariante berücksichtigt. Die mineralogischen Untersuchungen bestätigten jedoch die Beobachtungen im Gelände, daß es sich hier bereits um ein Gestein höheren Metamorphosegrades handelt und daß ein petrographischer Übergang zum Gneis vorliegt.

Am Standort Lackenberg wurden die Pedons I/A (Podsol) und I/B (Podsol-Braunerde), am Lusen die Pedons IV/B (Podsol) und IV/D (Podsol-Braunerde) von mir untersucht. Die Tabellen A.23.- A.24. im Anhang informieren über die allgemeinen bodenchemischen Kenndaten dieser vier Bodenformen, an denen ich mineralogische und Verwitterungsstudien durchführte.

Mineralogisch überprüft wurden die Feinsand-, Grobschluff- und Tonfraktion in den einzelnen Horizonten der repräsentativen Pedons. Die Fraktionierung gewann ich im Rahmen der Korngrößenanalyse (vgl. Kap. 3.1.), wobei zur Fällung der Tonminerale $MgCl_2$ -Lösung in die Tonsuspension gegeben wurde.

Nach der Gefriertrocknung stellte ich von der TONFRAKTION Texturpräparate mit den Behandlungen Mg-lufttrocken, Mg-Glycerin lufttrocken, K-lufttrocken, K-100°C, K-200°C, K-400°C und K-560°C her. Die Röntgenbeugungsdiagramme wurden mit einem PHILIPS-Röntgendiffraktometer mit $CoK\alpha$ -Strahlung aufgenommen. Die Identifizierung der einzelnen Tonminerale erfolgte durch Berechnen der d-Werte aus der Lage der Röntgenpeaks. Die quantitative Auswertung geschah durch Ausplanimetrieren

(OTT-Kompensations-Polarimeter, Typ 30.115) der Peaks und Multiplikation der Flächen mit den mineralspezifischen Gewichtungsfaktoren (GJEMS 1967). Für homogene Profile wurde eine Bilanzierung versucht.

Die FEINSAND- und GROBSCHLUFF-FRÄKTIONEN wurden, zunächst mit Na-Dithionit (vgl. Kap. 3.1) behandelt, um Eisenüberzüge auf den Mineralalkörnern zu entfernen. Die Dichtentrennung erfolgte mit 1,1,2,2-Tetrabromäthan (Dichte $2.965-2.967 \text{ g/cm}^3$) in 250 ml Scheidetrichtern in Anlehnung an BOENIGK (1983). Die pro Abtrennvorgang gewonnene Leicht- und Schwermineralfraktion wusch ich mit Aceton und trocknete sie. Die Schwerminerale wurden in das flüssige Einbettungsmittel (MOUNTEX, Brechungsindex 1.67) auf einem Objektträger gestreut.

Die Bestimmung der SCHWERMINERALE (Dichte 2.96 g/cm^3) der Feinsand- und Grobschluff-Fraktion nahm ich im Durchlicht an einem ZEISS-Polarisationsmikroskop nach MILNER 1962), GRIMM (1973) und BOENIGK (1983) vor. Pro Präparat wurden 250-300 Körner ausgezählt.

Die LEICHTMINERALE (Dichte 2.96 g/cm^3) wurden in ein Einbettungsmittel mit dem Brechungsindex 1.54 (Kanadabalsam) gestreut und unter dem Phasenkontrastmikroskop nach einer Schnellbestimmungsmethode (GEEHARDT et al. 1967) ebenfalls mit 250-300 Körnern pro Präparat ausgezählt. Diese Methode erwies sich gegenüber der Anfärbemethode (SCHLICHTING und BLUME 1966) als weitaus genauer und damit besser reproduzierbar.

Ergänzend zu den Mineralbestimmungen wurden Aufnahmen an einem Rasterelektronenmikroskop (REM, JOEL-JSM-35 C) mit angeschlossenen Si(Li)-X-ray-detector (EG & G ORTEC) durchgeführt. Hierbei verglich ich die Feinsand- und Grobschluff-Fraktionen verschiedener Horizonte der podsoligen Braunerde aus Amphibolit (V/D, Hoher Bogen) mit jenen eines Podsoles aus Granit (IV/B, Lusen).

5.2.1.2. Sequentieller Batch-Versuch

In diese Experimente wurde luftgetrocknete Feinerde ($<2 \text{ mm}$) aus verschiedenen Horizonten der Hauptfolge einbezogen, da nur für den von den Fichten durchwurzelten Oberboden ein Abschätzen der Freisetzung basischer Kationen interessant war.

Im Vorversuch überprüfte ich den A- und 2 B-Horizonte der Podsol-Braunerde am Lackenberg (I/B), wobei ein B-Horizont am Übergang zur Basisfolge lag.

Im Hauptexperiment waren aus jedem Kartiergebiet (Granit, Paragneis, Glimmerschiefer/Paragneis, Amphibolit) jeweils ein schwach und ein stark podsoliertes Pedon mit charakteristischen Horizonten vertreten.

VORVERSUCH

In einem Vorversuch wurden pro Horizont jeweils 3x50g Feinerde in Zentrifugenbecher eingewogen und mit 50ml dest. Wasser bzw. 10^{-4} M HNO_3 oder 10^{-4} M Zitronensäure versetzt. Mit der Zugabe der Säuren sollte der Einfluß einer mineralischen und einer organischen Säure verglichen werden. Die Konzentration von jeweils 10^{-4} M wurde gewählt, um möglichst naturnahe Bedingungen einzustellen. Nach HEIL (pers. Mitteilg.) wies das stammbare Sickerwasser unter einem Fichtenaltbestand am Lusen einen mittleren pH-Wert von $\text{pH}=4.2$ auf. Die gewählten Säurekonzentrationen sind also für die Hochlagenbereiche charakteristisch.

Im Gegensatz zu ähnlichen Forschungsansätzen (SÜSSER 1987; PRENZEL 1982) wurde das Volumen-Verhältnis von Lösung zu Festsubstanz sehr niedrig gehalten; mit einem Wert von 1:1 entspricht es weitgehend dem Quotienten aus fester und flüssiger Phase des Bodens bei Feldkapazität. Bei einem weiteren Verhältnis ist mit einem großen Verdünnungseffekt zu rechnen. Außerdem werden bei steigendem Volumen und abnehmendem Elektrolytkonzentration der Außenlösung bevorzugt einwertige Kationen aus und mehrwertige eingetauscht (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984).

Den mit den jeweiligen Reaktionslösungen versetzten Proben wurde zur Vermeidung mikrobieller Umsetzungen 1 ml Toluol zugegeben. Die Zentrifugenbecher wurden verschlossen, ihr Inhalt zur Suspension aufgeschüttelt, mit lichtdichtem Material umgeben und in einen bei 17°C thermokonstanten Raum gestellt. Eine Temperatur von 10°C wäre nach den Bodentemperatur-Messungen von ELLING (1987) naturnäher gewesen, konnte aber aus technischen Gründen nicht für die Versuchsdauer von 80 Tagen erreicht werden.

Nach 10 Tagen, innerhalb derer man die Proben alle 3 Tage kurz zur Suspension aufschüttelte, wurden die Proben 30 Min. bei 3500 U/Min. zentrifugiert. Wir dekantierten die überstehende Lösung und bestimmten ihren pH-Wert mit einer Glaselektrode. Anschließend wurde sie über einen Membranfilter (Porengröße $0.45 \mu\text{m}$) mittels Vakuumpumpe filtriert; das Filtrat bewahrten wir bis zur Analyse bei 4°C im Kühlschrank auf.

Das nach dem Zentrifugieren im Zentrifugenbecher verbliebene Bodenmaterial wurde erneut entweder mit dest. Wasser bzw. 10^{-4} M Salpeter- und Zitronensäure so versetzt, daß das ursprüngliche Bodens:Lösungsverhältnis wieder 1:1 betrug. Danach gaben wir wieder 1 ml Toluol zu, verschlossen die Becher erneut und bewahrten sie nach Aufschütteln im thermokonstanten Raum unter Lichtabschluß auf. Diese Sequenz von Analyseschritten wurde insgesamt achtmal durchgeführt.

Nach jeder 10-tägigen Extraktionsphase wurden in den gewonnenen Lösungen folgende Ionen bestimmt: Al, Fe, Ca und Mg am Atom-Absorptions-Spektralphotometer, Na und K flammenphotometrisch. Am Photometer wurden außerdem die Konzentrationen an gelösten organischen Stoffen bei

320 nm Wellenlänge gemessen. Zusätzlich wurde nach 10, 40 und 80 Tagen für Al und Fe eine Fraktionierung in eine labile und eine stabile Form mittels eines Austauschharzes durchgeführt (VERLOO und COTTENIE 1972).

Aus den Ergebnissen des Vorversuches wurde deutlich, daß durch diese Art eines sequentiellen Batch-Versuches nur Elementmengen herausgelöst werden, die pro Termin i.d.R. hinter den mit 0.5 M NH_4Cl bei der Bestimmung der Kationen-Austauschkapazität extrahierten Mengen zurückbleiben. Aus diesem Grunde wurde ein neues Versuchskonzept erarbeitet.

HAUPTVERSUCH

Für den Hauptversuch wurden für einen A- und 2 B-Horizonte von jeweils zwei verschiedenen stark podsolierten Pedons pro Standort (Granit, Paragneis, Glimmerschiefer/Paragneis und Amphibolit) jeweils 55g Feinerde (<2mm) in einen 250 ml Schüttelbecher eingewogen und mit 250 ml 1 M BaCl_2 -Lösung versetzt. Das Endvolumen von 1:5 wurde am Schüttelbecher markiert, dieser luftdicht verschlossen und der Inhalt zur Suspension aufgeschüttelt. Anschließend schüttelten wir diese Suspension zwei Stunden auf einem Horizontalschüttler und ließen sie über Nacht stehen. Am nächsten Tag wurden die Proben nochmals 30 Min. horizontal geschüttelt und danach bei 3000 U/Min. zentrifugiert. Die überstehende Lösung filtrierte man über Vakuumpumpe und Membranfilter, wobei der Vorlauf von ca. 3 ml verworfen wurde. Für jeden Horizont wurden zwei Parallelproben angesetzt.

Das im Schüttelbecher verbleibende Bodenmaterial versetzten wir erneut mit 1 M BaCl_2 so, daß das ursprüngliche Boden-Lösungs-Verhältnis wieder 1:5 betrug, schüttelten zwei Stunden horizontal, zentrifugierten und filtrierten erneut. Dieser Vorgang wurde noch ein drittes Mal wiederholt.

Aus allen drei Filtraten einer Bodenprobe wurde eine Mischprobe hergestellt und am AAS bzw. Flammenphotometer auf die Elemente Ca, Mg, Al, Fe, Na und K untersucht. Dabei fanden wir, daß durch die Belegung der Austauscher mit Barium die austauschbar gebundenen Kationen annähernd qualitativ verdrängt wurden (vgl. Kap. 3.2.6.). Bei einer Verwendung dieser so vorbehandelten Böden im Batch-Experiment zur Verwitterungssimulation und bei gleichzeitiger Hemmung der Mineralisation konnte davon ausgegangen werden, daß die dabei "freigesetzten" Ionen hauptsächlich aus den Mineralen (Silikaten) freigesetzt werden. BaCl_2 wurde zum Eintausch verwendet, da es nur wenige organische Stoffe in Lösung bringt und austauschbare H^+ - und Al^{3+} -Ionen vollständig ersetzt (KRUG et al. 1984).

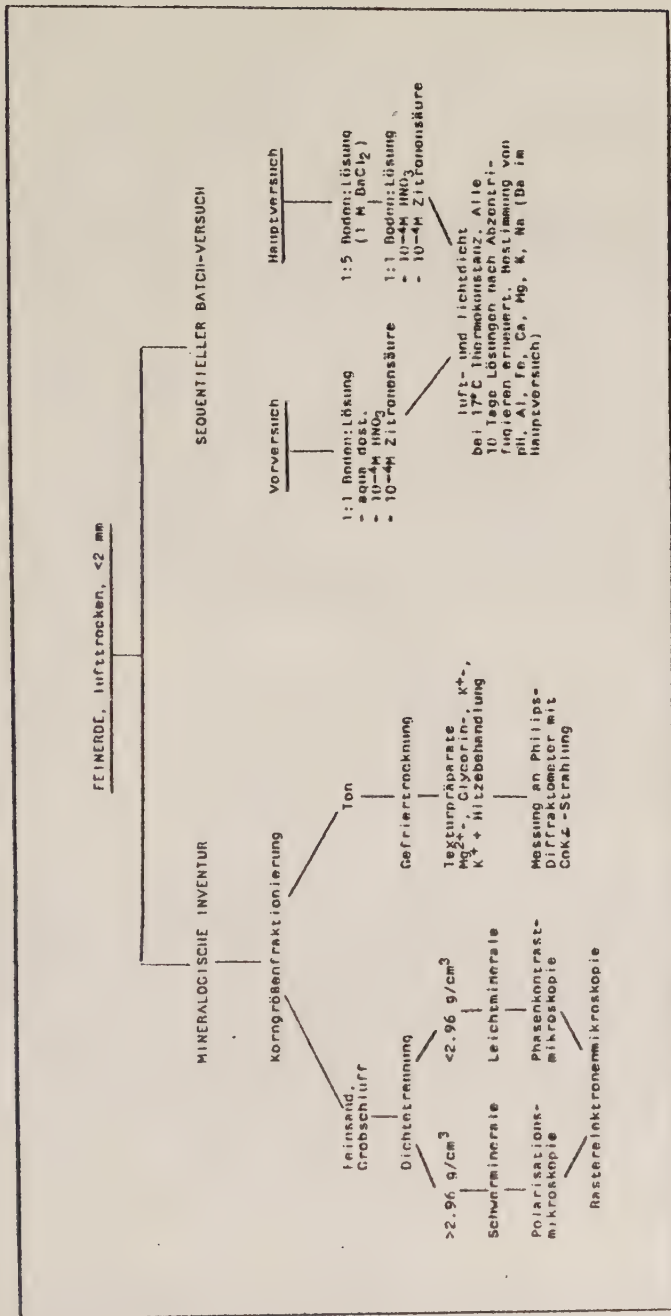
Um das überschüssige BaCl_2 aus den Proben zu entfernen, wurden diese 2 Mal mit je 250 ml 96%-igem, vergälltem Äthylalkohol ausgewaschen (30 Min. Horizontalschütteln, Zentrifugieren und Dekantieren). Anschließend trockneten wir die Proben bei 35°C.

Vor diesem getrockneten Probenmaterial wurden genau wie beim Vorver-

sich 50 g Feinerde pro Horizont (Parallelproben) eingewogen, mit 50ml 10^{-4} M Salpeter- bzw. Zitronensäure versetzt und entsprechend weiterbehandelt. Wiederum erneuerten wir nach einer 10tägigen Versuchssequenz die Lösungen und führten den sequentiellen Batch-Versuch über eine Gesamtdauer von 80 Tagen durch.

Zusätzlich zu den im Vorversuch gemessenen Ionen (Al, Fe, Ca, Mg, Na und K) wurde auch Ba an einem ICP 5500 der Firma PERKIN ELMER bestimmt.

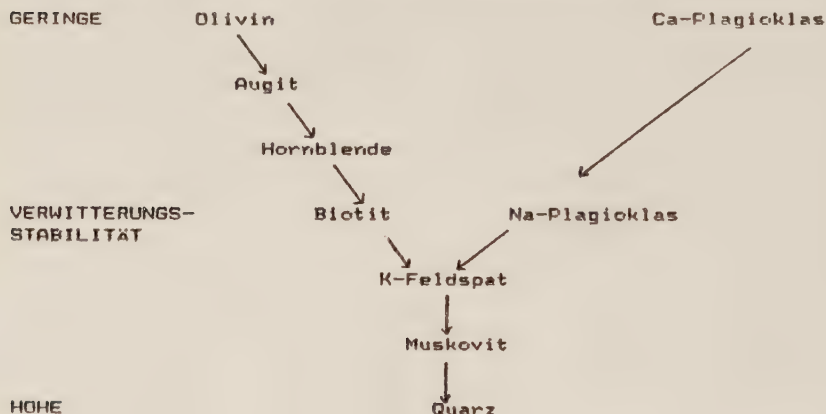
Die einzelnen Untersuchungsschritte des eigenen Forschungsansatzes sind in einem Flußdiagramm zusammengestellt (Abb. 5.1.).



5.3. Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen

5.3.1. Primäre Silikate

Die Neubildung von Tonmineralen geht mit der Verwitterung primärer Silikate einher. Ihre Verwitterbarkeit hängt unter anderem vom Vernetzungsgrad des Silikatgitters, von der Korngröße und von der Kationenkonzentration in den Silikaten ab. Nach GOLDICH (1938) reihen sich die Minerale, welche die kristallinen Gesteine aufbauen im Hinblick auf ihre Verwitterungsstabilität wie folgt:



In eine für die Klärung der Verwitterungsmechanismen und -intensitäten notwendige Mineral-Bilanzierung gehen die Gewichtsanteile der jeweiligen Kornfraktionen mit ein; deshalb kommt der Bestimmung der Kornanteile eine besondere Rolle zu. Hierbei konnte ich auf die Ergebnisse der Korngrößenanalyse im Rahmen der allgemeinen bodenanalytischen Untersuchungen zurückgreifen. Voraussetzung für die quantitative Abschätzung der Mineralveränderungen innerhalb eines Pedons ist die Homogenität des Ausgangsmaterials für das gesamte Profil. Diese läßt sich nicht exakt beweisen (BRONGER et al. 1976), man kann sie nur mehr oder weniger gut belegen, wobei die Anwendung mehrerer Überprüfungskriterien die Sicherheit der Aussage erhöht. Folgende Kriterien (nach BARSHAD 1964; BRONGER et al. 1976) wurden herangezogen:

-Gesamtmineralogische Analyse mit besonderer Berücksichtigung der Schwerminerale

-Verhältnis zweier verwitterungsresistenter Minerale (Quarz und Zirkon)

-angenäherte Konstanz der Gewichtsanteile des Quarzes in der Feinsand- und Grobschluff-Fraktion der verschiedenen Horizonte.

Da der Quarz in den hier untersuchten Böden weitaus häufiger auftrat als der Zirkon, wurde die annähernde Konstanz der Gewichtsprozentage des Quarzes als Indiz für vertikale petrographische Homogenität des Ausgangssubstrates gewertet (vgl. Tab. 5.1.)..

PODSOLIGE BRAUNERDE (V/D) am HOHEN BOGEN

Die Schwermineralgehalte unterscheiden sich erheblich nach dem Ausgangsgestein. Während der Schwermineralanteil auf Amphibolit in der Feinsand-Fraktion im Mittel 60 Kornprozent beträgt, liegt er bei Böden auf Granit und Paragneis zwischen 5-7 Kornprozent (Abb. 5.2.). Besonders auffällig ist der starke Rückgang der Schwerminerale im Grobschluff auf Amphibolit (Abb. 5.3. oben). Entsprechend dem basischem Charakter des Amphibolits bestehen in den untersuchten Kornfraktionen ca. 90% der Schwermineralfraktion aus einer Fe- und Mg-reichen Hornblende (vgl. Tab. 5.2.). Unter dem Polarisationsmikroskop und mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes konnten stark korrodierte Hornblenden in allen Horizonten beobachtet werden (vgl. Abb. 5.4.-5.6.).

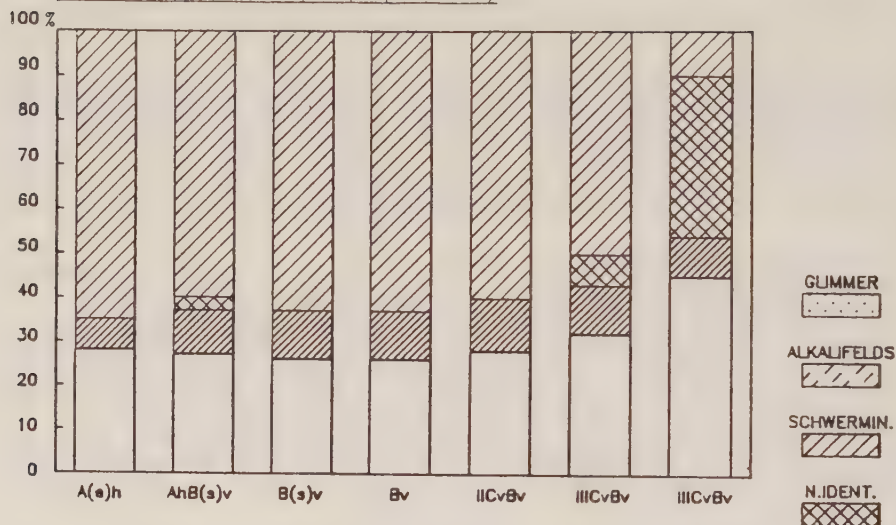
Anders verhält es sich in den mit III bezeichneten, tieferen Horizonten. Hier handelt es sich um Reste eines Paläobodens, der sehr stark verwittert ist; dies kommt unter anderem durch das Verschieben der Schwermineralgehalte von der Feinsand in die Grobschluff-Fraktion und das hohe Quarz/Feldspatverhältnis zum Ausdruck, das die Werte des Oberbodens z.T. sogar übertrifft (Tab. 5.1.). Die relativ Ca-reichen Plagioklase des Ausgangsgesteins (39-55% Anorthit; ROSE pers. Mitt.) sind recht verwitterungsanfällig. Das Quarz/Feldspat-Verhältnis zeichnet in der Grobschluff-Fraktion besser als in der Sandfraktion, was auf der rascheren chemischen Verwitterung der kleineren Körner beruht.

Ein Vergleich der vom Staatlichen Forschungsinstitut für angewandte Mineralogie Regensburg zur Verfügung gestellten Daten über die geochemische Zusammensetzung des Amphibolits mit den Ergebnissen der Element-Gesamtanalyse für die Feinerde (<2mm) zeigt, daß Al, Ca und Mg in der Feinerde deutlich, Fe, Mn und Na dagegen nur schwach abgenommen haben, während K sogar erhöhte Werte aufweist (vgl. Tab. 5.3. und Tab. 3.11.). Die Verarmung an Al, Ca und Mg in der Feinerde gegenüber dem Ausgangsgestein läßt auf eine elementselktive Verwitterung schließen, die hier besonders das Ca, Mg und Al der Plagioklase und Hornblenden betrifft. Daneben ist ein großer Teil dieser Elemente in der Fraktion >2mm und somit im Feinskelett- und Steinanteil gebunden, wo die chemische Verwitterung nur ungenügend angreifen kann.

Aus Tab. 5.1. geht weiter hervor, daß die Mg-liefernde Hornblende (85-

FEINSAND

podsolige Braunerde(V/D;Amphibolit)



Braunerde-Podsol(III/C;Paragneis)

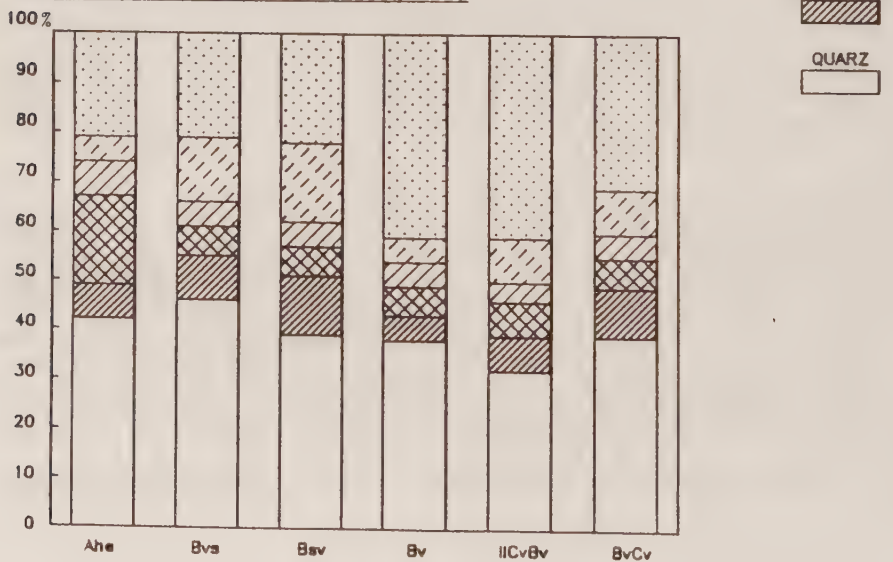


Abb.5.2.: Leicht- und Schwermineralverteilung (Kornprozent) in der Feinsand-Fraktion ausgewählter Pedons aus Amphibolit (Hoher Bogen) und Paragneis (Rachel).

GROBSCHLUFF

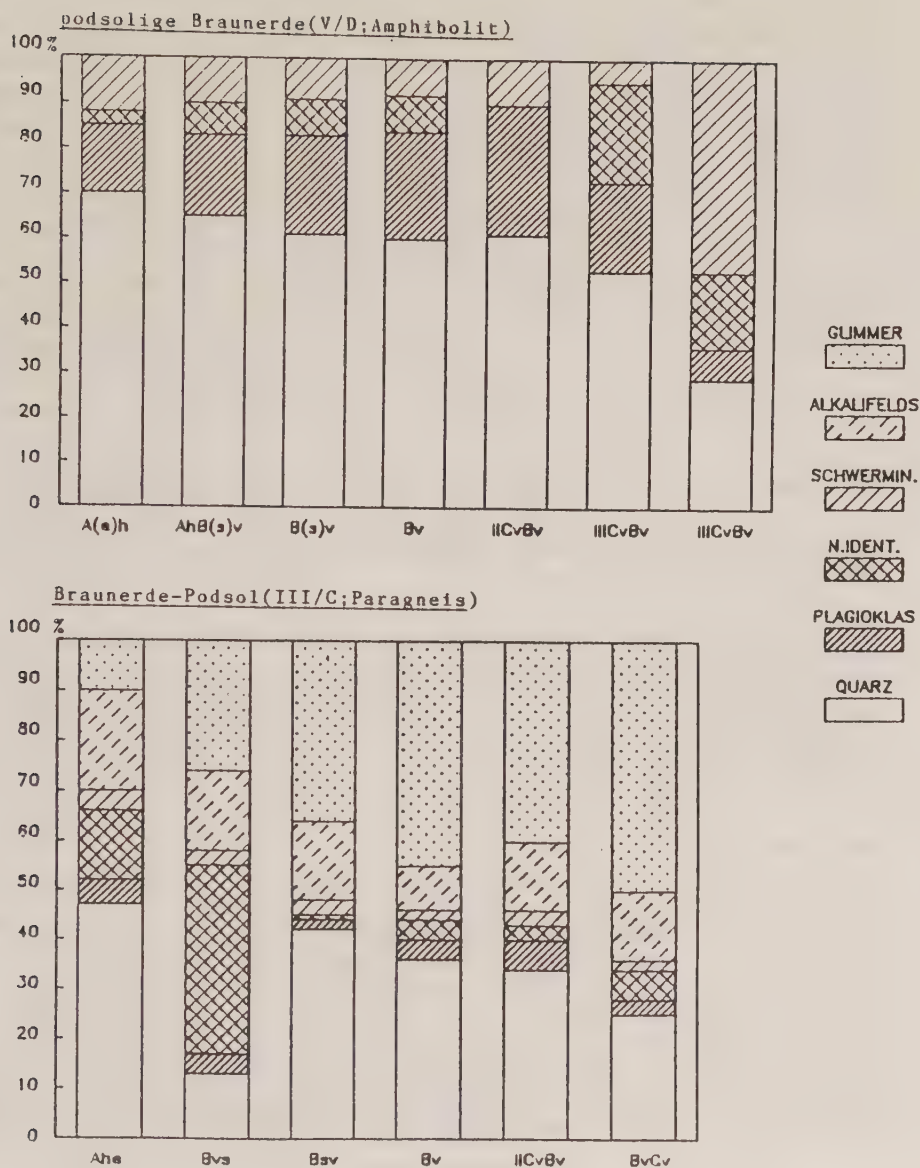


Abb.5.3.: Leicht- und Schwermineralverteilung (Kornprozent) in der Grobschlufffraktion ausgewählter Pedons aus Amphibolit (Hoher Bogen) und Paragneis (Rachel).

-90% der Schwerminerale) im Feinsand angereichert ist und im Grobschluff nur in geringen Gehalten auftritt. Nimmt man dies auch für den Mittel- und Feinschluff an, welcher der chemischen Verwitterung am stärksten unterliegt, so wird verständlich, warum es an diesem Standort zu Mg-Mangelerscheinungen an der Fichte kommen kann, obwohl dessen Feinerde im Vergleich zu den Bodenformen aus Gneisen und Graniten 10-fach höhere Mg_1 -Gehalte aufweist. Das Auftreten von Mg-Chlorit in der Tonfraktion scheint diesen Mangel nicht wett machen zu können (vgl. Kap.5.3.2.). Auch weisen die niedrigen pH Werte im Oberboden von pH (H_2O) = 3.6-4.1 und die hohe Al-Sättigung der Austauscher im gesamten Mineralboden (Kap.3.2.6.) darauf hin, daß die Silikatverwitterung zu langsam abläuft, um die Ca- und Mg-Sättigung hoch zu halten.

NICKEL (1973) fand in zahlreichen Laborversuchen mit unterschiedlichen pH-Werten der Versuchslösung verschiedene Verwitterungssequenzen für primäre Silikate (Korngröße 20-35 μm). So nahm die Verwitterungsstabilität bei pH=3.6 wie folgt zu:

Apatit<Almandin<Epidot<Turmalin<Staurolith<Albit<Disthen<Hornblende<Quarz<Muskovit<Zirkon und Rutil.

Die Reihenfolge änderte sich bei höheren pH-Werten, z.B. bei pH=5.6:

Apatit<Almandin<Hornblende<Epidot<Albit<Quarz<Staurolith und Turmalin
Disthen<Muskovit<Zirkon und Rutil.

NICKEL erklärte diese unterschiedlichen Positionen der einzelnen Minerale in Abhängigkeit vom pH-Wert der Verwitterungslösung mit der verschiedenartigen Ausbildung einer vor weiterer Auflösung konservierenden Schutzschicht. Obwohl eine solche Schutzschicht von mir nicht nachgewiesen werden konnte (vgl. Kap.5.3.1.1.), bietet die von NICKEL gefundene relativ hohe Verwitterungsstabilität der Hornblende bei tiefem pH-Wert eine Erklärung für den offensichtlich langsamen Zerfall dieses Silikates am Hohen Bogen.

BRAUNERDE-PODSOL(III/C) am RACHEL

Auch für Pedon III/C am Standort Rachel lassen die Gewichtsanteile des Quarzes in der Feinsand- und Grobschluff-Fraktion in den verschiedenen Horizonten auf Homogenität des Ausgangsmaterials schließen (Tab.5.1.). Die extrem niedrigen Mg-Gesamtgehalte in der Feinerde (<2mm) gegenüber dem Amphibolit-Standort Hoher Bogen sind zum einen mit den geringen Hornblende-Gehalten zu erklären (vgl. Tab.5.2.). Zum anderen beruhen sie vor allem in den obersten Horizonten der Hauptfolge auf weit fortgeschrittener Auflösung des Mg-Chlorites unter dem Einfluß organischer Säuren (Kap.5.3.2.). Der im Paragneis relativ reichlich vorhandene Biotit enthält i.A. um etwa die Hälfte geringere Mg-Gehalte als die Hornblende (DIXON und WEED 1977).

Podentyp: Humus-Eisen-Podsol (IV/B Lusen, Granit)

Horizont	Quarz		Plagiokl.		Alkalifeldspat		Qu./Fs.		Glimmer		Schwermin.	
	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu
e	53/8	47/4	7/1	1/-	24/4	36/3	1.8	1.3	9/1	12/1	7/1	4/-
ehBis	51/8	47/2	8/1	2/-	20/3	24/1	1.9	1.8	15/2	23/1	5/1	4/-
sh	52/5	47/2	5/1	2/-	18/2	23/1	2.3	1.9	19/2	25/1	6/1	3/-
hs	46/2	45/1	6/-	4/-	16/1	20/-	2.1	1.9	26/1	27/1	6/-	4/-
ISwCvBv	47/6	45/3	10/1	4/-	16/2	20/1	1.8	1.9	20/3	28/2	7/1	3/-
CvSwBv	46/2	44/2	7/-	3/-	14/-	21/1	2.2	1.8	26/1	29/2	7/-	3/-
SwCvBv	44/3	45/3	8/-	4/-	14/1	18/1	2.0	2.0	28/2	29/2	6/-	4/-
ISdCv	44/7	42/6	8/1	4/1	14/2	20/3	2.0	1.8	27/4	31/4	7/1	3/-

Podentyp: podsolige Braunerde (V/D Hoher Bogen, Amphibolit)

Horizont	Quarz		Plagioklas		Q/Plag.		Schwermin.		Übrige	
	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu
(e)h	28/4	70/9	7/1	15/2	4.0	4.7	65/10	12/2	-	3/1
hB(s)v	27/4	65/12	10/2	18/3	2.7	3.6	60/10	10/7	3/1	7/1
(s)v	26/4	61/9	11/2	22/3	2.3	2.8	63/8	9/1	-	8/1
v	26/4	60/10	11/2	24/4	2.3	2.5	63/9	8/1	-	8/1
ICvBv	28/6	61/11	12/2	29/5	2.3	2.1	60/10	9/2	-	-
IICvBv1	32/5	53/9	11/2	20/3	2.9	2.7	50/7	5/1	7/1	22/4
CvBv2	45/7	29/4	9/1	7/1	5.0	4.1	10/2	47/6	36/5	17/2

Podentyp: Braunerde-Podsol (III/C Rachel, Paragneis)

Horizont	Quarz		Alkalifelds.		Plag.		Q/Fs		Glimmer		Schwermin.	
	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu
he	42/6	47/2	5/2	20/2	7/1	5/1	2.0	1.9	21/3	20/2	7/1	4/-1
vs	46/7	13/1	13/2	16/2	9/1	4/1	2.1	2.3	21/3	26/3	5/1	3/-1
sv	39/8	42/4	16/3	16/2	12/2	2/-	1.4	2.3	22/4	36/4	5/1	3/1
v	38/7	36/4	5/1	9/1	5/1	4/-	3.8	2.8	41/7	45/5	5/1	2/1
ICvBv	32/8	34/6	9/2	14/2	7/2	6/1	2.0	1.7	41/11	40/7	4/1	3/1
BvCv	39/10	25/5	9/2	14/3	10/3	3/1	2.1	1.5	31/8	50/10	5/1	2/1

Podentyp: Podsol-Braunerde (I/B Lackenberg, Glimmerschiefer-Paragneis)

Horizont	Quarz		Plagiokl.		Alkalifelds.		Qu./Fs.		Glimmer		Schwermin.		Übrige	
	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu	fs	gu
(e)h	75/18	58/5	4/1	5/-	9/2	17/1	5.8	2.6	8/2	16/1	4/1	4/-	-	-
hBsv	56/6	51/6	8/1	5/1	8/1	14/2	3.5	2.7	18/2	22/3	4/-	5/1	6/1	3/-
sv	34/3	33/3	9/1	4/-	9/1	12/1	1.9	2.1	42/4	44/4	5/1	6/1	1/-	1/-
ICvBv	33/7	35/2	9/2	2/-	2/-	8/1	3.0	3.5	41/8	48/3	5/1	6/-	-	1/-
IICv	44/6	35/4	4/1	4/-	4/1	8/1	5.5	2.9	39/5	40/5	3/1	7/1	6/1	6/1

Tab.5.1.: Leicht- und Schwermineralverteilung (Kornprozenze/Gewichtsprozenze) in der Feinsand- und Grobschlufffraktion ausgewählter Pedons aus verschiedenem Ausgangsgestein.

Unter den Schwermineralen, die in diesem Braunerde-Podsol am Rachel nur ca. 5% der Gesamtminerale ausmachen, dominiert der Granat (Almandin: $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) sowie der Sillimanit (Al_2SiO_5). Glimmer (vorwiegend Biotit) tritt untergeordnet ebenfalls, zumindest teilweise, in der Schwermineral-Fraktion auf, da seine Dichte je nach Fe-Gehalt zwischen $2.79\text{--}3.3 \text{ g cm}^{-3}$ schwanken kann (vgl. Tab.5.2.).

Unter den Leichtmineralen (Dichte $< 2.96 \text{ g cm}^{-3}$) herrschen Quarz und Biotit vor. Entgegen den Gewichtsanteilen steigen die Kornprozentanteile des Quarzes im Oberboden insbesondere in der Feinsand-Fraktion an, bedingt durch relative Anreicherung gegenüber verwitterungseinstabilen Mineralen (Biotit, Plagioklas; Abb.5.2.). Ebenso wird Zirkon im Oberboden akkumuliert (Tab.5.2.). Entsprechend nimmt das Quarz/Feldspatverhältnis als Maß für die Verwitterungsintensität mit zunehmender Profiltiefe ab. Der durchschnittliche Anorthit-Gehalt der Plagioklasse ist mit ca. 25% um etwa die Hälfte niedriger als am Hohen Bogen (BAUBERGER et al. 1977); dies erklärt u.a. die um den Faktor 10 niedrigeren Ca-Gesamtgehalte der Feinerde (vgl. Kap. 3.2.5). Für das Paragneisgebiet des Rachels liegen keine geochemischen Modalanalysen vor, mit denen meine Werte verglichen werden könnten.

In den Horizonten der Hauptfolge steigen die Kornprozentanteile der Biotite vom Feinsand zum Grobschluff an. Aus den tormineralogischen Untersuchungen (Kap.5.3.2.) ist die dominierende Rolle des Illits neben den Wechsellagerungsmineralen in diesem Pedon bekannt (vgl. Tab.5.5.). Die Abb.5.2. und 5.3. zeigen die Bedeutung der Glimmer für die Entstehung der Torminerale. Geht man davon aus, daß die Basisfolge von der holozänen Verwitterung nur schwach betroffen ist, so läßt sich nach dem Muster von SCHEFFER et al. (1966) und BRONGER et al. (1976) für die Feinsand- und Grobschluff-Fraktion aus den Gewichtsanteilen in beiden Fraktionen ein Glimmerabbau von max. 79% im Ahe und etwa 30% in den B-Horizonten errechnen (vgl. Tab.5.2.). Für die Plagioklasse beträgt die Abbaureate max. 50%, die Alkalifeldspat-Gehalte zeigen keine nennenswerte Verschiebung. Da die Plagioklasse jedoch insgesamt mit sehr geringen Gehalten vertreten sind (vgl. Abb.5.2. und 5.3.), müssen diese Zahlen vorsichtig interpretiert werden.

Einen Glimmerabbau im Braunerde-Podsol (III/C) am Rachel von 79–30% steht ein Tongewinn in der Größenordnung von max. 13% gegenüber. Diese Torneubildung ist sehr gering (vgl. BRONGER et al. 1976); man muß also davon ausgehen, daß ein erheblicher Teil der verwitterten primären Silikate völlig aufgelöst und daß ihre Zerfallsprodukte ausgewaschen wurden. Dies ist vor allem im Ahe-Horizont sehr deutlich, während das Verhältnis von ca. 30% Glimmerabbau zu 13% Torneubildung in den B-Horizonten jenem von rezenten Braunerden entspricht (vgl. BRONGER et al. 1976).

Etwas günstiger sind die Verhältnisse am Hohen Bogen. Dort steht einem Plagioklasabbau in der Feinsand- und Grobschluff-Fraktion des A(e)h von 60% und in den B-Horizonten von 30% eine Torneubildung von max. 18% gegenüber.

Bodentyp: Eisen-Humus-Podsol (IV/B Lusen, Granit)

Horizont	Zirkon		Epidotgr.		Glimmer		Amphibol		Apatit		Opak		Ubrige	
	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU
Ae	56	76	42	7	-	9	3	4	-	-	47	51	-	4
AehBhs	26	31	41	21	8	34	13	2	9	7	26	54	3	5
Bsh	7	10	6	2	23	78	14	-	35	9	24	24	15	1
Bhs	11	23	12	11	18	8	18	2	35	2	23	65	-	-
IIISwCvBvs	25	81	20	5	12	4	17	-	32	7	31	63	4	3
CvSwBvs	5	13	8	6	11	66	15	14	53	15	9	17	9	-
SwCvBsv	2	11	7	-	14	79	14	3	63	6	7	4	-	+
IIISdCvBv	8	61	10	9	4	6	25	-	53	10	21	76	-	14

Bodentyp: Podsolige Braunerde (V/D Hoher Bogen, Amphibolit)

Horizont	Zirkon		Epidotgr.		Amphibol		Opak		Ubrige	
	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU
A(e)h	3	5	7	5	85	84	+	5	4	-
AhB(s)v	3	+	8	4	87	83	4	3	2	8
B(s)v	2	3	14	8	80	81	9	5	10	2
Bv	+	2	7	7	91	79	9	6	+	2
IIIBvCv	+	2	7	4	91	84	5	+	2	4
IIICvBv1	-	-	7	4	92	92	6	+	-	2
CvBv2	-	-	8	20	92	80	8	3	-	-

Bodentyp: Braunerde-Podsol (III/C Rachel, Paragneis)

Horizont	Zirkon		Rutil		Andalusit		Sillimanit		Epidotgr.		Glimmer		Amphibol		Granat		Apatit		Opak	
	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU
Ahe	2	24	3	5	3	2	17	17	-	-	11	9	4	-	58	33	2	3	48	56
Bvs	3	11	3	6	+	2	19	17	8	-	15	16	4	-	43	47	5	+	30	61
Bsv	+	7	4	5	-	2	29	21	3	-	26	12	6	-	27	48	3	5	45	62
Bv	-	8	+	10	-	3	7	1	2	2	82	1	3	-	5	70	-	3	7	68
IIICvBv	-	10	2	8	+	+	17	2	+	-	42	44	8	-	59	27	2	2	30	59
BvCv	-	33	-	6	-	+	10	3	3	+	3	10	2	3	21	49	3	-	18	50

Bodentyp: Podsol-Braunerde (I/B Lackenberg, Glimmerschiefer-Paragneis)

Horizont	Zirkon		Rutil		Sillimanit		Glimmer		Amphibol		Granat		Apatit		Opak		Ubrige	
	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU	fs	gU
A(e)h	-	30	4	10	9	-	4	+	6	-	66	58	3	-	15	31	5	-
AhBsv	-	16	6	13	6	-	10	3	11	2	59	61	3	-	9	30	4	4
Bsv	-	10	7	11	5	2	2	10	8	6	65	61	7	-	11	-	5	-
IIICvBv	-	2	7	7	6	5	8	14	14	10	50	62	6	-	12	37	-	-
IIICv	-	8	2	5	7	-	7	42	13	2	58	1	9	7	16	8	4	6

Tab.5.2.: Schwermineral-Verteilung (Kornprozente) in der FEinsand- und Grobschlufffraktion ausgewählter Pedons aus verschiedenem Ausgangsgestein.

	Standort/Pv.-Nr.						
	Neuweg	Burg-stall	Burg-stall	Grenz-weg	Schwarz-holz	Blätter-berg	Ständel-berg
	83 001	83 004	83 005	83 014	83 033	83 027	84 023
SiO ₂ / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	45.52	47.63	41.47	47.39	45.41	45.78	41.52
Al ₂ O ₃ "	13.63	14.61	11.16	14.15	14.23	12.04	13.67
FeO "	13.86	11.37	21.29	12.42	12.19	16.58	17.79
MnO "	0.22	0.21	0.23	0.21	0.20	0.26	0.27
MgO "	8.61	8.46	7.45	7.17	9.62	7.73	7.68
CaO "	11.92	11.84	10.70	11.26	12.13	10.24	11.97
Na ₂ O "	2.15	2.17	1.88	2.81	1.84	2.44	2.00
K ₂ O "	0.10	0.10	0.11	0.11	0.10	0.22	0.24
TiO ₂ "	2.14	1.34	3.70	2.00	1.80	2.43	2.96
P ₂ O ₅ "	0.19	0.12	0.15	0.18	0.19	0.40	0.29
Cu "	35	37	32	62	28	35	11

Tab.5.3.: Geochemische Zusammensetzung des Amphibolits am Hohen Bogen.
(Staatl. Forschungsinstitut f. angewandte Mineralogie/Regensburg)

HUMUS-EISEN-PODSOL (VI/B) am LUSEN

Am Standort Lusen (Granit) weisen sowohl die Gewichtsanteile des Quarzes als auch die Zirkon-Kornprozentage in der Feinsand- und Grobschluff-Fraktion der verschiedenen Horizonte das untersuchte Pedon als inhomogen aus (Tab.5.1 und 5.2.). Dies wird auch durch die Berechnung eines quantitativen Schichtungsparameters für die Körnung sowie durch die Ergebnisse der Gesamtanalyse bestätigt (vgl. FÖRSTER 1988). Die Ergebnisse der Tonanalyse zeichnen jedoch die im Gelände aufgrund von Gefügemerkmalen vorgenommene Unterteilung in Haupt- und Basisfolge nach (Tab.5.4.).

Die hohe Verwitterungsintensität in der Hauptfolge spiegelt sich in einer Anreicherung von Quarz und Alkalifeldspäten in den Feinsand- und Grobschluff-Fraktionen der obersten drei Horizonte wieder. Gleichzeitig findet ein deutlicher Glimmerabbau in beiden Fraktionen und ein Plagiolasabbau im Grobschluff statt (Tab.5.1.).

Auch die Verteilung der Schwerminerale belegt eine deutliche Abnahme der Verwitterungsintensität mit ansteigender Profiltiefe. Der extrem

stabile Zirkon und der stabile Epidot reichern sich, unabhängig von der bereits erwähnten Inhomogenität des Pedons in den A-Horizonten im Vergleich zu den instabilen Mineralen Hornblende, Granat und besonders Apatit an (Tab.5.2.)..

Die insgesamt höheren Zirkon-Gehalte in der Grobschluff-Fraktion entsprechen der Auskristallisation dieses Minerals in dieser Korngröße im Ausgangsgestein. Die auffällig hohen Apatit-Kornprozentage und die für saures Gestein hohen Amphibolwerte entsprechen den Untersuchungsergebnissen von DILL und ZECH (1980) an einem Hochlagen-Podsol im Lusengebiet. Sie fanden zwischen dem in 1.60 m Tiefe anstehenden Granitzersatz und den darüberliegenden periglazialen Schuttdecken deutliche Unterschiede in der Schwermineralgarnitur. Eine scharfe Grenze zwischen Zersatz und Basisfolge wurde markiert durch das schlagartige Einsetzen von Apatit und Hornblende und durch den Wegfall des Sillimanit in der Basisfolge. DILL und ZECH werteten dieses Ergebnis als Beweis für die Schichtigkeit des untersuchten Profils, hervorgerufen durch kalzeitliche Solifluktion und äolischen Eintrag. Einen mineralogischen Unterschied zwischen Haupt- und Basisfolge konnten sie ebenfalls nicht feststellen. Das von mir studierte Pedon IV/B am Lusen reicht nicht bis in den Granitzersatz hinein, so daß die hohen Amphibol- und Apatit-Gehalte in den untersuchten Kornfraktionen der Haupt- und Basisfolge nur in Anlehnung an DILL und ZECH als äolische Einmischungen diskutiert werden können.

Die durch das Tonmineralspektrum (Tab.5.4.) und die Leicht- und Schwermineralanalyse gekennzeichnete, intensive Verwitterung in den Oberbodenhorizonten des Humuseisenpodsoles am Lusen ist sicher durch das tonarme, schluffig-sandige bis lehmig-sandige Substrat gefördert. Es treten hier bei gleichem Regionalklima und gleicher Reliefposition größere Sickerwassermengen in der lockeren Hauptfolge auf als bei lehmigem und tonigem Substrat. Die geringen, bei der Verwitterung primärer Silikate anfallenden K-, Ca-, Mg- und Na-Mengen werden rasch ausgewaschen; die pH-Werte sinken auf diese Weise schnell unter pH=4, was wiederum den Zerfall der Glimmer und Plagioklase beschleunigt (KAUPEN-JOHANN et al. 1987). Die intensive Silikatverwitterung und die rasche Abfuhr der Alkali- und Erdalkalimetalle führen auch dazu, daß es in der Hauptfolge zu keiner Tonanreicherung kommt (Tab.5.4.).

Im Vergleich zu den geochemischen Modalanalysen des Finsterauer Kristallgranites (RICHTER 1977), der das Lusenmassiv aufbaut, weist die Feinerde deutlich geringere Gehalte an Metallkationen auf. Der Verlust ist beim Fe am geringsten (30%), während er bei den basischen Kationen Ca, Mg, Na und K 66%, 59%, 46% und 55% beträgt. Der Al-Anteil ist insgesamt um 65% verringert. Entweder liegt ein erheblicher Teil der in der Feinerde fehlenden Ionenmengen noch im Bodenskelett vor, oder es wurde bereits präglazial durch Verwitterung eine große Stoffmenge freigesetzt und abgeführt.

Für die erstere Annahme spricht die Tatsache, daß die Abweichungen für die Fe-Gehalte am geringsten sind, so daß der raschere mechanische Zerfall eisenhaltiger Minerale und ihr leichter Übergang in die Feinerde für die Verschiebungen verantwortlich sein kann. Da diese Minerale

aber auch Ca- und Mg-reich sind und hier eine starke Abnahme festgestellt wurde, ist intensive Verwitterung die wahrscheinlichste Ursache, wobei das freigesetzte Fe als Oxid-Hydroxid in der Feinerde verbleibt.

Natürlich beruhen diese "Bilanzen" nur auf groben Schätzungen, da die geochemischen Daten für den Granit aus einer Mehrzahl von Einzelanalysen stammen, und die wirklichen Elementgehalte des Ausgangsgesteins für das Pedon nicht bekannt sind.

Die Ca-Gesamtgehalte der Feinerde von Pedon IV/B am Lusern liegen um den Faktor 5 niedriger als am Hohen Bogen, die Na_2O -Gehalte hingegen sind 3 mal, die K_2O -Gehalte sogar 5mal so hoch wie auf Amphibolit (vgl. Tab.3.5. und Tab.A.24.). Dieser Befund läßt sich zum einen mit dem geringen Anorthit-Gehalt der Plagioklasse am Lusern (23-28%) erklären (VOLLMER 1969; zit. in BAUBERGER 1977); dem steht ein relativ hoher Anteil an Alkalifeldspäten gegenüber. Die niedrigen MgO -Gehalte sind wie am Rachel durch die geringen Hornblendeanteile am Gesamtmineralbestand bedingt. Die Intensitätsverhältnisse der Illit-Peaks in der Tonmineralanalyse (Kap.5.3.2.) zeigen eher Fe-reiche als Mg-reiche Glimmervarietäten in diesem Pedon an (Tab.5.8.).

Eine Bilanzierung des Glimmer- und Feldspatabbaus ist aufgrund der Inhomogenität des Pedons nicht möglich.

PODSOL-BRAUNERDE (I/B) am LACKENBERG

Die Podsol-Braunerde am Lackenberg aus Glimmerschiefer/Paragneis weist wie die bereits besprochenen Formen aus saurem Ausgangssubstrat einen sehr niedrigen, zwischen 4 und 7% liegenden Schwermineral-Gehalt auf. Sowohl im Feinsand als auch im Grobschluff dominiert der Granat ($\text{Alman-din:Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), so daß sowohl die niedrigen Schwermineral-Gehalte als auch die Zusammensetzung der Schwermineral-Fraktion für ihren geringen Beitrag zur Silikatpufferung verantwortlich sind.

Unter den Leichtmineralen herrscht in den A-Horizonten der Quarz vor; in den B-Horizonten ist der Glimmeranteil höher als im Oberboden. Die Anorthit-Gehalte der Plagioklasse am Lackenberg liegen bei 23-30% (PRO-PACH 1965). Vernachlässigt man den überdurchschnittlich hohen Gewichtsprozent-Anteil des Quarzes in der Feinsand-Fraktion des Aeh-Horizontes, so ist dieses Profil homogen; eine Bilanzierung war deshalb möglich.

Einem Tongewinn von 10-13% in den B-Horizonten steht ein Glimmerabbau von 30% gegenüber. Der oberste Horizont weist praktisch keinen Anstieg der Tonfraktion im Vergleich zum Ausgangsmaterial (Basisfolge) auf, (Tab.5.5.), doch fand ein Glimmerabbau von max.75% im Feinsand und von 55% im Grobschluff statt. Die Plagioklas-Gehalte dieses Pedons sind so niedrig, daß eine Bilanzierung nicht sinnvoll erscheint.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß trotz der schwachen Podsolierung

im obersten Horizont eine erhebliche Abfuhr der Zerfallsprodukte aus der Silikatverwitterung stattfindet. Bei fortschreitender Podsolierung wird sich der Bereich intensiven Silikatzerfalls in tiefere Horizonte verlagern. Ein solche starke Verarmung an Silikaten wird sich ökologisch deshalb besonders nachteilig auswirken, da die durchwurzelte Hauptfolge hier nur ca. 36cm mächtig ist.

5.3.2. Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie

Auf den basenarmen Standorten in den Hochlagen des Bayerischen Waldes mit saurem Ausgangsgestein ist für die Nachlieferung von Mg und Ca die Verwitterung der Biotite und Plagioklase von großer Bedeutung. Nur auf Amphibolit am Hohen Bogen trägt auch der Hornblendezerfall dazu bei.

Verschiedene Autoren (CORRENS und ENGELHARDT 1938; WOLLAST 1967; HELGESEN 1971; EUSENBERG und CLEMENCY 1976) weisen darauf hin, daß die chemische Verwitterung von Feldspäten bestimmt wird durch die Intensität der Diffusion von Ionen durch eine schützende Lage von alumosilikatischen Verwitterungsprodukten um das verwitternde Mineral. Diese Hypothese stützt sich auf die Ergebnisse verschiedener Laborexperimente, bei denen im Laufe der Versuchsdauer eine abnehmende Freisetzungsrates beobachtet wurde.

Neuere Untersuchungen (BERNER und HOLDREN 1977; BERNER et al. 1980) mit dem Rasterelektronenmikroskop und der röntgenphotoelektronischen Spektroskopie (XPS) zeigten jedoch, daß die Auflösung von Feldspäten primär an Stellen hoher Energie (z.B. Gitterstörungen) an der Kristalloberfläche vorstatten geht; sie ist somit nicht gleichmäßig über die Mineraloberfläche verteilt. Auch fand man keine Hinweise auf die Existenz einer Schutzschicht.

Für die eigenen Aufnahmen am Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden Proben aus einzelnen Horizonten der podsoligen Braunerde am Hohen Bogen (Profil V/D) und des Humus-Eisen-Podsols am Standort Lusen (Profil IV/B) verwendet.

PODSOLIGE BRAUNERDE (V/D) am HOHEN BOGEN

In den obersten 2 Horizonten der Bodenform aus Amphibolit zeigen sowohl die Amphibole als auch die Ca-reichen Plagioklase im Feinsand und im Grobschluff deutliche Auflösungsmuster (Abb. 5.4.-5.6.). Die Hornblende in der Grobschluff-Fraktion weist tiefe, lineare Ätzspuren entlang der Spaltflächen auf, während in der Feinsand-Fraktion erst linienartige Ätzspuren zu beobachten sind. Die Plagioklase haben unabhängig von der Korngröße relativ großflächige, prismatische Ätzgruben. Diese Verwitterungsspuren treten mit gleicher Intensität im Ober- und Unterboden auf; es ist deshalb davon auszugehen, daß sie z.T. bereits der präglazialen Verwitterung entstammen (Abb. 5.4. und 5.6.).



Abb.5.4.: REM-Aufnahme von Amphibolen (rechter Bildrand und links unten) und Plagioklasen (links und Mitte oben) der Grobschlufffraktion im A(e)h-Horizont einer podsoligen Braunerde (V/D) am Hohen Bogen (Amphibolit). 5mm=10µm.



Abb.5.5.: REM-Aufnahme von Plagioklasen der Feinsandfraktion im A(e)h-Horizont einer podsoligen Braunerde (V/D) am Hohen Bogen (Amphibolit). 15mm=100µm.

Auffällig ist das in den tieferen Horizonten häufige Auftreten von anscheinend gerundeten Mineralen (Abb.5.8.), die jedoch von einer amorphen, Si- und Al-reichen Schicht umgeben sind, so daß eine Identifizierung mit dem am REM angeschlossenen Detektor nicht möglich war. Diese amorphe Schicht enthielt verschiedene hohe Fe-Anteile (Abb.5.6.). Ähnliche Beobachtungen machten FARMER (1982) und WILSON (1986) in Bs-Horizonten schottischer Podsole aus Granit und TAIT et al. (1978; zit. in FARMER 1986) in Braunerden unter Wald. FARMER stellte fest, daß Al und Kieselsäure unter sauren Bedingungen (pH<5) sich sehr rasch zu einer kolloidalen, stabilen Phase des sog. Proto-Imogilit vereinen, in dem das Al:Si-Verhältnis zwischen 3.2-4 schwanken kann.

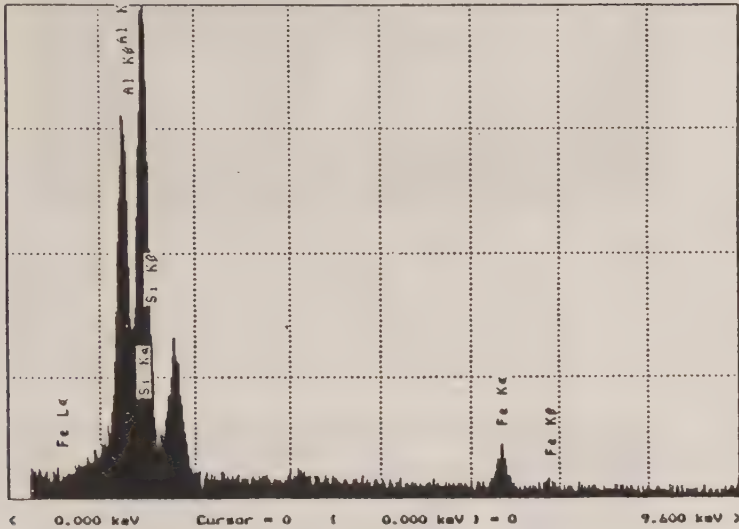


Abb.5.6.: Si(Li)-Röntgendetektor-Aufnahme der Si- und Al-reichen, amorphen "Hüllen" um primäre Silikate (Proto-Imogilit-Allophan?) in der Grobschlufffraktion im IICvBv-Horizont des Pedons V/D am Hohen Bogen.

Diese Proto-Imogilit-Fragmente können unter günstigen Bedingungen (pH (H₂O)>4.8, Bodenlösung übersättigt an Si und Al) als Kristallisationskeime für Imogilit-Röhren fungieren, während sie unter ungünstigen Verhältnissen (Si-Konzentration <2 µg Si cm⁻³) als amorphes Gel bzw. als Proto-Imogilit-Allophan ausfallen. Sie liegen dann in Form kleiner, unregelmäßiger Sphäroide vor. Nach YOSHINAGA (1966) enthalten diese



Abb.5.7.: REM-Aufnahme von Amphibolen (links und rechts oben), Plagioklasen (Mitte unten) und "gerundeten", mit amorphem Si-Al-Gel überzogenen Silikaten (Mitte oben =Abb.5.8.-und rechts unten) in der Grobschlufffraktion im IICvBv-Horizont des Pedons V/D am Hohen Bogen. 5mm=10µm.

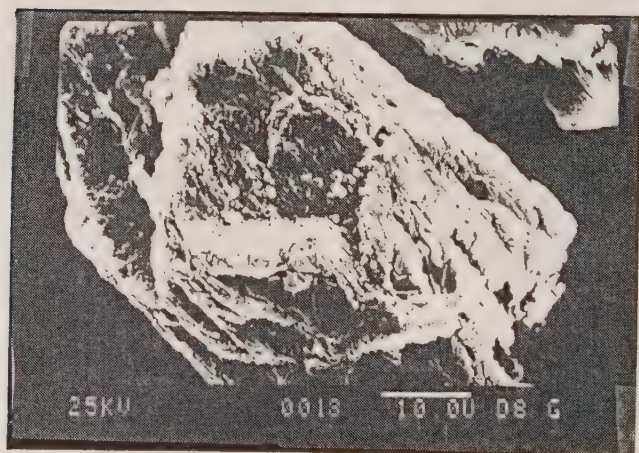


Abb.5.8.: Überzug eines Si-Al-reichen, amorphen Materials auf einem primären Silikat in der Grobschlufffraktion im CvBv-Horizont des Pedons V/D am Hohen Bogen. 18mm=10µm.

Allophane geringe, aber signifikante Mengen an Fe (0.3-0.9% als Fe_2O_3). Da diese Proto-Imogolite oberhalb $\text{pH}=5$ stabile Formen bilden (FARMER 1986), ist auch verständlich, warum sie durch die Vorbehandlung des in dieser Studie untersuchten Materials mittels Na-Dithionit-Extraktion ($\text{pH}=7.3$) nicht in Lösung gingen.

Eventuell handelt es sich bei diesen amorphen, Si- und Al-reichen Gebilden in der Feinerde des Pedons V/D am Hohen Bogen um vererbte, in den periglazialen Schuttdecken aufgearbeitete Strukturen aus dem an der Pedonbasis aufgeschlossenen Paläoboden. Im feucht-tropischen Klima während des Tertiärs könnte es zu einer verstärkten Si-Abfuhr gekommen sein, so daß bei relativer Anreicherung von Al diese amorphe Masse gebildet wurde. Hierfür spricht auch, daß diese Formen nur in diesem Pedon auftraten, wo Paläobodenmaterial in die Basisfolge eingemischt ist.

HUMUS-EISEN-PODSOL (IV/B) am LUSEN

Die Plagioklase zeigen im Ae-Horizont des Podsols aus Granit deutlichere Ätzspuren als in dem nur schwach podsolierten Oberboden des Pedons V/D aus Amphibolit. Die Alkalifeldspäte sind dagegen aufgrund ihrer größeren Verwitterungsresistenz weniger angegriffen. Die Plagioklase sind von prismatischen Ätzgruben überzogen (Abb. 5.9.-5.10.), die z.T. bereits eine charakteristische, rauhe und zernarbte Mineraloberfläche bedingen. In diesem Verwitterungsstadium sind die Feldspäte sehr zerbrechlich und können bei der Vorbehandlung zerfallen und so die jeweils nächst niedrigen Kornfraktionen vermehren. Diese intensiven Auflösungsspuren sind bei den Plagioklasen der Grobschluff-Fraktion etwas stärker als im Feinsand ausgebildet.

In den Anreicherungshorizonten des Podsols treten die Verwitterungs- und Zersetzungsspuren etwas zurück, sind aber immer noch weitaus deutlicher als am Vergleichsprofil am Hohen Bogen. Auch im obersten Horizont der Basisfolge laufen offensichtlich Verwitterungsvorgänge ab, erkennbar in einem Aufblättern eines Fe-reichen Glimmers (Abb. 5.11.). Somit dringt die Verwitterungsfront bereits in die dichte Basisfolge vor, was durch das schluffig-sandige Substrat begünstigt wird.

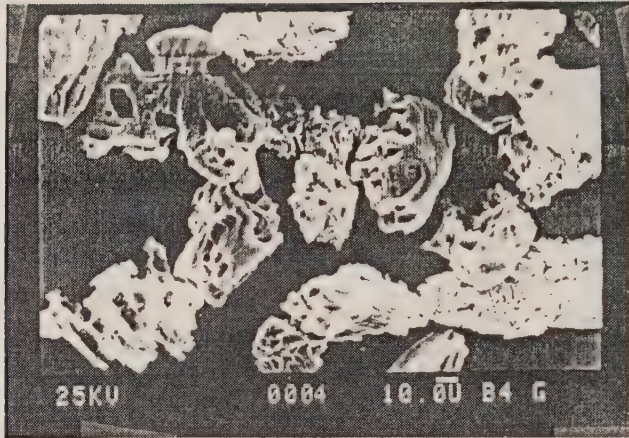


Abb.5.9.: REM-Aufnahme von Plagioklasen und Kalifeldspäten (rechts unten) in der Grobschlufffraktion aus dem Ae-Horizont des Podsoles (IV/B) am Lusen (Granit). 5mm=10µm.

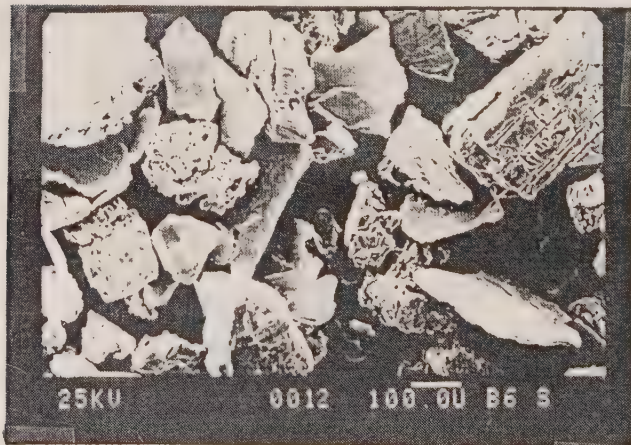


Abb.5.10.: REM-Aufnahme von Plagioklasen (rechts oben), Quarz (Mitte unten) und dazwischenliegenden Fe-reichen Glimmern in der Feinsandfraktion aus dem Ae-Horizont des Podsoles (IV/B) am Lusen (Granit). 10mm=10µm.



Abb.5.11.: REM-Aufnahme von Plagioklasen und einem aufblätternden Glimmer (links unten Mitte) in der Grobschlufffraktion des IICvBvs-Horizontes eines Podsoles (IV/B) am Lusen (Granit).
5mm=10µm.

5.3.3. Tonminerale

Die qualitative Auswertung der Tonmineralanalysen für die Hauptfolge aller untersuchten Pedons ergab folgende Tonmineralgarnitur: Illit, Vermikulit, Wechsellagerungsminerale, sekundärer Chlorit und Kaolinit. Dieses Spektrum ist für die pedogenetische Stellung der untersuchten Böden charakteristisch und stimmt mit bereits vorliegenden Daten überein (DBG 1975).

Die Tonfraktion in der Basisfolge (entspricht den mit II bezeichneten Horizonten) ist qualitativ und quantitativ ähnlich zusammengesetzt. Sie unterscheidet sich von jener der Hauptfolge vor allem durch das Fehlen von 10-14Å Wechsellagerungsmineralen und das Auftreten von primärem Chlorit.

Wahrscheinlich stammt der in den Pedons gefundene Tonmineralbestand aus zwei Verwitterungsphasen;

-Aus einer präglazialen Verwitterung, durch die das Grundgebirge eine mächtige Verwitterungsrinde erhielt. Im Pleistozän wurde dieser Verwitterungsschutt soliflukktiv verlagert; dabei erfolgte eine Differenzierung in eine lockere, obere Hauptfolge und eine liegende, dichte Basisfolge. Beide Straten bilden das Ausgangssubstrat der holozänen Bodenbildung. Somit lagen zu deren Beginn schon bestimmte, "vererbte" Tonminerale vor, wie z.B. Mg-Chlorit, Illit, Vermikulit und Kaolinit. Der präholozän in Haupt- und Basisfolge vorhandene Kaolinit wurde vermutlich durch Frostverwitterung aus kaolinisierten Feldspäten freigesetzt.

-Während der relativ kurzen, holozänen Bodenbildungsphase wurden diese bereits vorliegenden Tonminerale teilweise umgewandelt (Transformation). Gleichzeitig bildeten sich aus den Zerfallsprodukten der primären Silikate (v.a. Glimmer) neue Minerale (Neoformation). Die Änderung des ursprünglichen präholozänen Tonmineralbestandes, der in den unteren Lagen der Basisfolge noch vorliegt, spiegelt folglich die Intensität der holozänen Verwitterung wieder.

Die regelmäßige Zunahme der Tongehalte in den Horizonten der Hauptfolge kann sowohl auf der starken Kryoturbaten Beanspruchung während des Periglazialklimas als auch auf fortgeschrittener Verlehmung durch die holozäne Bodenbildung beruhen (vgl. Kap.3.2.1. und 5.3.1.). Zudem erwiesen sich die deutlichen, im Gelände ausgeschiedenen Schichtgrenzen überwiegend als Körnungsgrenzen, während Chemismus und Mineralbestand beider Straten besonders bei den Hauptgemengteilen in den meisten der untersuchten Pedons relativ einheitlich waren. Da Lößbeimengungen in der Hauptfolge nicht nachgewiesen werden konnten, ist anzunehmen, daß Unterschiede im Tonmineralbestand zwischen Haupt- und Basisfolge überwiegend durch unterschiedliche Pedogenese zu erklären sind.

5.3.3.1. Vorkommende Tonminerale und ihre mutmaßliche Entstehung

10Å-MINERALE

Vernachlässigt man zunächst die Wechsellagerungsminerale, so tritt in der Tonfraktion der Bodenformen aus saurem Gestein (Granit, Paragneis, Glimmerschiefer/Paragneis) eine relative Vorherrschaft der 10Å Minerale auf (Tab. 5.4-5.6.). Für eine quantitative Auswertung wurden diese Tonminerale der Einfachheit halber unter dem Namen Illit geführt, obwohl die Meinungen über die Verwendung dieser Mineralbezeichnung auseinandergehen (vgl. DIXON and WEED 1977).

Die 10Å-Basisreflexe werden zusätzlich durch das Intensitätsverhältnis der (001)/(002)-Peaks differenziert, welches ein Maß für den Kristallisationsgrad der 10Å Minerale darstellt. Das Verhältnis $I(001)/(002)$ ist in dicktaedrischen Varietäten dieser Tonminerale kleiner als in triektaedrischen (THOREZ 1976). THOREZ unterscheidet auch zwischen Mg-reichen Varietäten mit einem Intensitätsverhältnis von 2 und Fe-reichen Formen mit einem Quotienten von 3. Entsprechend dieser Einteilung dominieren an den Standorten Lackenberg und Rachel Mg- und Fe-arme Illite, während am Lusen auch Fe-reiche, triektaedrische Glimmer in der Tonfraktion vorliegen (Tab. 5.8.). Die relative Abnahme des Intensitätsverhältnisses, die sich in allen Pedons im Oberboden mehr oder weniger deutlich abzeichnet, weist auf eine Abnahme des Kristallisationsgrades der 10Å Minerale hin. Die Reflexe werden an ihrer Basis zunehmend breiter, d.h. aus gut kristallisierten Glimmern bilden sich durch K-Verarmung im Oberboden Illite mit randlich aufgeweiteten Schichten (vgl. Abb. A.9.1-9.6. im Anhang), was auch durch die Asymetrie ihrer Peaks bei K-Belegung zu erkennen ist.

WECHSELLAGERUNGSMINERALE

In allen Profilen nehmen die Illite im Oberboden ab, die 10-14Å Wechsellagerungsminerale jedoch entsprechend zu (Tab. 5.4.-5.6.). Dies deutet auf die pedogene Entstehung der Wechsellagerungsminerale aus Illit hin. Wechsellagerungsminerale bilden sich schon rasch bei geringer Veränderung der Verwitterungsbedingungen. Speziell die K-Freisetzung aus Biotiten ist im sauren Milieu groß. Zusätzlich kann man auch eine Neubildung von Wechsellagerungsmineralen aus Gerüst- und Bandsilikaten in allen untersuchten Pedons erwarten, da infolge der Vergesellschaftung sehr verschiedener Minerale die Zusammensetzung der Verwitterungslösung kleinräumig und auch zeitabhängig großen Schwankungen unterworfen ist.

Bei den 10-14Å Wechsellagerungsmineralen handelt es sich meist um Illit-Vermikulit-Varietäten mit wechselnden Anteilen beider Minerale. Zur Ausbildung einer regulären Wechsellagerung dieser beiden Komponenten im Verhältnis 50:50 kommt es nur in den Oberbodenhorizonten der Podsole am Lusen (Profil VI/B) und am Lackenberg (Profil I/I), was mit

Standort: Lusen (Granit)

Pedon D $\equiv$ Podsol-Braunerde

Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Aeh	48	7	29	15	-	14	5.4	3.9
Bsv	38	9	36	18	-	17	4.2	4.1
Bvs	34	19	16	26	-	13	6.2	4.2
SwBsv	16	19	39	22	5	13	4.4	4.2
IIBvCv	-	76	15	7	verd.	11	2.1	4.4

Pedon B $\equiv$ Podsol

Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Ae	46	17	18	19	-	6	2.4	3.5
Aeh	47	21	20	12	-	7	8.4	3.7
Bsh	48	19	21	11	-	9	8.1	3.7
Bs	29	19	29	18	5	12	6.3	4.4
IIBsv	-	40	15	8	8	12	2.6	4.5
IIIGoBvs	-	4	79	7	4	9	5.5	4.5
GoBsv	-	4	86	6	5	6	5.8	4.4
IVCvBv	-	-	55	23	22	16	1.6	4.5

Tab.5.4.: Tonmineralbestand zweier Pedons am Standort Lusen.

Standort: Lackenberg (Glimmerschiefer/Paragneis)

<u>Pedon B $\hat{=}$ Podsol-Braunerde</u>								
Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
SwAeh	48	15	20	14	-	16	3.4	4.3
AhBsv	35	15	29	16	5	27	1.9	4.5
Bsv	10	10	37	37	6	24	1.6	4.6
IICvBv	-	13	49	29	8	14	1.5	4.8
IIIGoCv	-	10	64	20	6	8	1.8	4.8

<u>Pedon A $\hat{=}$ Podsol</u>								
Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Aeh	14	12	53	22	-	5	13	4.1
Ae	26	10	42	17	-	4	12	4.1
Bsh	42	12	34	13	-	9	8	4.3
Bhs	13	6	55	18	5	8	6	4.7
Bvs	13	6	54	19	5	6	4	4.7
IICvBv	-	16	62	18	5	5	3	4.9
BvCv	-	6	81	8	5	6	1	4.9

Tab.5.5.: Tonmineralbestand zweier Pedons am Standort Lackenberg.

Standort: Rachel (Paragneis)Pedon C ≡ Braunerde-Podsol

Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Aeh	35	17	35	13	-	22	2.7	4.5
Bvs	40	19	39	14	-	22	3.4	4.6
Bsv	28	15	35	15	7	13	3.4	5.0
Bv	23	19	27	24	7	12	3.3	5.1
IICvBv	7	42	27	19	7	9	3.7	5.2
BvCv	-	25	51	10	14	7	3.5	5.0

Pedon A ≡ Hanggley-Podsol

Horizont	WLM /	Verm.	Ill. %	Kaol.	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Aeh	37	17	31	15	-	14	4.5	4.5
GoAhe	32	12	38	11	7	19	3.3	5.1
Bvs	32	10	40	9	8	12	4.0	5.0
Bsv	28	14	40	9	9	13	2.9	4.9
Bv	-	52	30	18	verd.	10	3.5	4.9
IICvBv	-	63	20	13	verd.	8	4.5	4.7
BvCv1	-	31	41	21	7	8	4.2	4.7
BvCv2	-	5	30	49	15	5	8.1	4.7

Tab.5.6.: Tonmineralbestand zweier Pedons am Standort Rachel.

Standort: Hoher Bogen (Amphibolit)Pedon D $\equiv$ podsolige Braunerde

Horizont	WLM /	Verm.	Kaol.	Ill. %	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
A(e)h	35	8	49	8	-	31	1.5	3.8
AehBsv	29	7	47	10	7	32	1.5	4.1
B(s)v	5	5	75	10	5	32	1.4	4.6
Bv	-	14	59	13	14	27	1.5	4.8
II(Cv)Bv	-	12	62	13	13	14	2.5	4.7
IIICvBv	-	12	67	12	9	15	2.8	4.7
BvCv	-	-	86	5	9	16	3.8	4.5

Pedon C $\equiv$ Podsol-Braunerde

Horizont	WLM /	Verm.	Kaol.	Ill. %	Chl.	Ton /	Fe _d /Ton	pH (H ₂ O)
Aeh	30	20	45	5	-	26	1.6	4.1
B s v	27	28	35	10	-	25	1.6	4.8
Bv	22	20	39	12	7	17	1.5	5.0
II(Cv)Bv1	-	20	49	15	16	11	1.5	4.9
(Cv)Bv2	-	65	23	12	verd.	10	1.6	4.7
IIIBvCv	-	25	40	16	18	12	1.9	4.5

Tab.5.8.: Tonmineralbestand zweier Pedons am Standort Hoher Bogen.

der intensiven Auswaschung zusammenhängen könnte. Illit-Vermikulit-Chlorit-Wechselagerungen treten in allen tonmineralogisch untersuchten Bodenformen der Standorte Rachel, Lackenberg und Hoher Bogen auf.

Weitaus geringer sind die Anteile jener Wechselagerungsminerale, die eine Reflexdoublette bei 8.8 und 9.3Å aufweisen. Sie sind deshalb nicht in die quantitative Bewertung der Wechselagerungsminerale einbezogen. Die erwähnten Peaks sind besonders deutlich in den mit Mg belegten Präparaten zu erkennen (vgl. Abb. A.9.1-9.8. im Anhang). Die zugehörigen Tonminerale zeigen keine Aufweitungs- und Kontraktionstendenzen und werden durch Hitzebehandlung zerstört. In Anlehnung an STAHR (1979) und STAHR et al. (1983) werden diese Minerale als Wechselagerungen von kaolinitischen mit illitischen (oder chloritischen) Zwischenschichten bezeichnet. Sie treten regelmäßig in den Unterböden der stark versauerten Pedons mit deutlicher Al-Verlagerung auf. Ähnliche Beobachtungen wurden auch von GEBHARDT (zit. in STAHR et al. 1983) an sauren Braunerden des norddeutschen Tieflandes gemacht. Ob die Entwicklung dieser Minerale von illitischen oder chloritischen Mineralen zum Kaolinit führt oder gar umgekehrt Kaolintone umgewandelt werden, konnte bislang nicht entschieden werden.

VERMIKULIT

Das Kontraktionsvermögen der Wechselagerungsminerale und der Vermikulite ist im Oberboden geringer als in tieferen Horizonten. Das deutet darauf hin, daß sich bereits polymere Al-Hydroxy-Kationen in die aufgeweiteten Zwischenschichtsräume dieser Minerale eingelagert haben, wodurch ihre Kationen-Austauschkapazität stark erniedrigt wird. Dafür steigt aber die Anionenadsorptionsfähigkeit, die für die Bindung von Sulfat in diesen Böden von Bedeutung sein dürfte. Die Bildung typischer sekundärer Chlorite aus Vermikuliten konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Die relativ hohen Humusgehalte bis in die tieferen Horizonte (vgl. Kap. 3.2.3.) ermöglichen eine Komplexierung des Aluminiums, was die sekundäre Chloritisierung behindert. Bei stärkerer Versauerung ab pH=4.2-4.5 wird Al beschleunigt mobilisiert (ULRICH 1985; SÜSSER 1988), so daß polymere Al-Hydroxy-Kationen aus den vermikulitischen Zwischenschichten wieder herausgelöst werden und sekundäre Chlorite somit wieder abgebaut werden können (vgl. STAHR et al. 1983). Dadurch werden diese Minerale erneut aufweitbar. Die Bildung von Smectiten, wie sie sowohl STAHR et al. (1983) in Böden aus Granit und Gneis im Südschwarzwald als auch BLUM et al. (1987) im stark sauren Stammablaufbereich von Buchenstandorten beobachteten, konnte für die hier untersuchten Pedons nicht nachgewiesen werden.

Es deutet sich jedoch in den Ae-Horizonten der Hochlagenpodsole eine Dealumination an, so daß unregelmäßige Wechselagerungsminerale mit vermikulitischen und smectitischen Anteilen auftreten. Eine völlige Dealumination der Vermikulite findet jedoch wahrscheinlich wegen der niedrigen Humusgehalte in diesen Eluvialhorizonten nicht statt (BJEMS 1970; KAPOOR 1973).

Standort/ Bodentyp	Horizont	I (001)/(002)	Bodentyp	Horizont	J (001)/(002)
Lacken- berg (Glimmer- schiefer/ Paragneis)	Podsol- Braunerde	SwAeh AhBsv Bsv IIcVBv IIIGoCv	Podsol	Aeh Ae Bsh Bhs Bsv IIcVBv BvCv	1.19 0.89 0.88 1.08 1.30 1.29 1.65
Rachel (Paragneis)	Braunerde- Podsol	Ahe Bvs Bsv Bv IIcVBv BvCv	Hanggley- Podsol	A(e)h GoAhe Bvs Bsv Bv IIcVBv BvCv (Bv)Cv	1.71 1.77 1.58 1.68 1.72 0.94 1.27 1.65
Lusen (Granit)	Podsol- Braunerde	Aeh Bsv Bvs SwBsv IIcVBv	Podsol	Ae AehBhs Bsh Bs IIbSv IIIGoBvs GoBsv IVCvBv	0.61 1.23 3.49 2.16 1.13 4.28 4.69 2.20

Tab.5.8.: Intensitätsverhältnisse der Peaks 1. und 2. Ordnung der 10 α -Minerale in verschiedenen Pedons.

Auffällig ist für die Mehrzahl der Pedons ein ausgeprägter Anstieg des Vermikulit-Gehaltes an der Schichtgrenze zwischen Haupt- und Basisfolge (vgl. Tab.5.4. und 5.6.). Im obersten Horizont der Basisfolge tritt eine Peakfolge bei 13.3, 6.39 und 3.19Å auf. Nach K-Behandlung zeigte sich keine Kontraktion; erst nach Erhitzen der Texturpräparate auf 200°C verschwindet die Peakreihe (vgl. Abb. A.9.1-9.6). FLEISCHMANN (1986), die diese Peaks ebenfalls in der Basisfolge saurer, podsolierter Böden des Fichtelgebirges beobachtete, interpretierte sie als Artefakt, WILKE et al. (1987) ordnete jedoch diese Peaks einer regulären Illit-Vermikulit-Wechselagerung mit 10% Illit- und 90% Vermikulit-Anteilen zu. Da sie auch in dem von ihm studierten Böden nur in tieferen Horizonten auftraten, bezeichnete er dieses Tonmineral als verwitterungsinstabil.

Nach einer Reihe eigener Tests (Verwendung nicht gefriergetrockneter Materials und verschiedener Dispergierungsmittel) kann es sich bei diesem Mineral nicht um ein Artefakt handeln. Da sein Auftreten immer mit einer Reduktion der Illit-Gehalte einhergeht, entsteht es wahrscheinlich aus Illiten durch fortgeschrittene Aufweitung. Eventuell handelt es sich um einen Vermikulit höherer Ladung, der sich unter speziellen Bedingungen an der Grenze Hauptfolge/Basisfolge bildet, wo die Bodenlösung auf die leicht stauende Schicht der Basisfolge trifft. Das würde auch erklären, warum der Gehalt dieses Tonminerals in den darunterliegenden Horizonten scharf zurückgeht (Tab.5.4. und 5.6.).

Eine endgültige Entscheidung über die Natur des Minerals bleibt offen, da eine weitere Überprüfung diese spezifisch mineralogischen Problems den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Primärer Chlorit wurde im Laufe der Verwitterung in den Oberbodenhorizonten entweder vollständig aufgelöst oder durch Herauslösen der Mg-Hydroxidschichten zu Vermikuliten umgeformt. Auch eine pedogene Vermikulit-Bildung durch K-Verarmung von Illiten über die Wechselagerungsminerale ist wahrscheinlich. Die Bildung typischer Vermikulite scheint jedoch hinter jener von Wechselagerungsmineralen aus Illiten zurückzubleiben, da der Vermikulit-Gehalt in den A- und B-Horizonten nicht in dem Maße zunimmt, wie Illit verschwindet (vgl. Tab.5.4.-5.7.).

In der Basisfolge tritt vereinzelt das Al-Hydroxid Gibbsit auf, das ebenso wie der primäre Chlorit durch Podsolierungsvorgänge überall dort aufgelöst wurde, wo die H^+ -Ionenkonzentration hoch ist und organische Säuren die Metalle chelatisieren.

KAOLINIT

Die im Vergleich zu den Pedons aus saurem Ausgangsgestein hohen Kaolinit-Gehalte am Hohen Bogen sind durch die Verwitterung von Flagioliten und Hornblenden entstanden. Sie erklären die unerwartet niedrige Kationen-Austauschkapazität von max. 10 mmolIA/100 g TB bei

deutlich höheren Tongehalten als auf Granit und Gneis. Daß es auf diesem ultrabasischen Gestein nicht zu einer Montmorillonit-Bildung kam, ist vermutlich auf die klimatisch bzw. höhenstufenbedingte schnelle Abfuhr der durch Verwitterung freigesetzten Ca- und Mg-Ionen zurückzuführen (RICE et al. 1985).

5.3.3.2. Unterschiede zwischen den Bodenformen und Ausgangsgesteinen

Die Analyseergebnisse der Untersuchungen zur Neubildung und Transformation von Tonmineralen zeigen in den untersuchten Pedons eine nach Podsolierungsgrad differenzierte, aber überall weit fortgeschrittene Verwitterung in der durchwurzelten Hauptfolge an, während in der liegenden Basisfolge die "vererbten" Tonminerale vermutlich nahezu unverändert vorliegen. Die Vermikulite der Hauptfolge aller Pedons weisen bereits eine beginnende Einlagerung von Al-Hydroxy-Kationen auf, welche die Kationen-Austauschkapazität dieser Minerale stark erniedrigt. Die hohen Humusgehalte in den Oberbodenhorizonten (Aeh bzw. Ahe) der Podsol-Braunerden und Braunerde-Podsole behindern jedoch die Bildung typischer sekundärer Chlorite. Im Gegensatz dazu deutet sich in den humusarmen, durch niedrige pH-Werte ($\text{pH(H}_2\text{O)} = 3,1-4,1$) gekennzeichneten Ae-Horizonten der Hochlagenpodsole eine Dealumination dieser Al-Vermikulite und die Bildung von Vermikulit-Smectit-Wechsel-lagerungsmineralen an.

Die Transformation von Vermikuliten in Al-Vermikulite stellt keine Pufferreaktion per se durch die Einwirkung von Protonen dar, sondern ist die Folge einer solchen, wenn man dem Konzept folgt, daß die basischen Kationen an permanenten Ladungen nicht durch H^+ (bzw. H_2O) verdrängt werden. H greift die Tonmineralstruktur oder Al-Hydroxide unmittelbar an, setzt aus ihr Al frei, das dann aufgrund seiner hohen Eintauschfähigkeit die austauschbaren Kationen austauscht (WIKLANDER und ANDERSON 1972; VEITH und SCHWERTMANN 1972). Somit läuft die Entbasung der mineralischen Austauscher über den Zwischenschritt der Al-Freisetzung ab, was der eigentlichen Protonenpufferung entspricht.

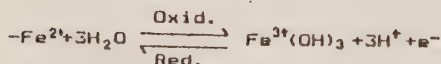
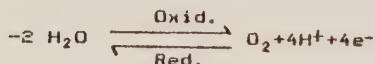
Neben einem nach dem Podsolierungsgrad der studierten Pedons differenzierten Tonmineralspektrum zeigen sich auch Unterschiede in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein sowohl im Tonmineralbestand als auch im Tongehalt der untersuchten Pedons. Die Tongehalte in der Hauptfolge der Amphibolit-Braunerden liegen mit 26-32% deutlich über jenen der Pedons aus Granit und Paragneis (max. 20%). Dies hat jedoch keinen Einfluß auf die Kationen-Austauschkapazität der Böden auf Amphibolit, die mit $5,10 \text{ mmol IA/100g TB}$ ähnlich niedrig liegt wie auf saurem Ausgangsmaterial. Dieser Befund ist durch die Dominanz des Kaolinitis in der Tonfraktion am Hohen Bogen zu erklären, der im Vergleich zu den Dreischichttonmineralen, die auf Granit- und Paragneisstandorten den Hauptanteil der Tonminerale bilden, eine deutlich geringere Austauschkapazität besitzt. Da der Kaolinit auch in der Basisfolge der Böden am Hohen Bogen das häufigste Tonmineral darstellt, ist davon auszugehen, daß es bereits während der intensiven Verwitterung unter tropischen Bedingungen im Tertiär zu einer ausgeprägten Verarmung von Alkali- und Erdalkalitionen und Silizium gekommen sein muß. Somit war meines Erachtens die Ausgangssituation zu Beginn der holozänen Pedogenese für die Böden am Hohen Bogen bis zu einem gewissen Grad ähnlich wie auf saurem Granit und Paragneis.

5.4. Ergebnisse des sequentiellen Batch-Versuches

5.4.1. pH-Wert

Die H^+ -Ionenkonzentration der in den Versuchen verwendeten Reagenzien lagen für dest. Wasser bei 2×10^{-6} Mol, für die Salpetersäure bei 1×10^{-4} Mol und für die Zitronensäure bei 1.2×10^{-4} Mol H^+ /l. .

Aufgrund dieser geringen H^+ -Ionenkonzentrationsunterschiede zwischen den eingesetzten Reagenzien waren die pH-Werte der überprüften Bodenlösungen an den verschiedenen Sequenzterminen sehr ähnlich (vgl. Tab. A.25 und A.26 im Anhang), so daß in Abb. 5.12. nur die pH-Werte im Extrakt von einer Behandlungsvariante jeweils für den Vor- und den Hauptversuch dargestellt wurden. Im Laufe der 80-tägigen Versuchszeit kam es sowohl im Vorversuch als auch im Hauptversuch zu einem kontinuierlichen Anstieg des pH-Wertes (Abb. 5.12. a. und b.), dem jedoch keine Freisetzung basischer Kationen in die Bodenlösung gegenüberstand. Diese pH-Erhöhung kann deshalb wahrscheinlich durch abnehmende Redoxpotentiale der Bodenproben im geschlossenen System erklärt werden. Viele Reduktionsreaktionen führen nämlich zu einem Verbrauch von H^+ -Ionen und damit zu einer pH-Erniedrigung, wie aus den folgenden Beispielen deutlich wird (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984):



Die Bodenluft wurde im Laufe des Versuches auch aus Aggregat-Feinporen verdrängt; die vermutlich einsetzenden Reduktionsvorgänge ließen in diesen mäßig sauren Böden den pH-Wert ansteigen. Diese Zunahme war folgerichtig in den humusreichen A-Horizonten stärker als in den Bv-Horizonten.

Im Hauptversuch mit den Ba-belegten Proben lagen in der ersten Versuchsphase die pH-Werte, unabhängig vom zugesetzten Reagenz, deutlich tiefer als in den entsprechenden Horizonten des Vorversuches (Abb. 5.12.). Dieser Befund ist wie folgt zu erklären:

-Nach der Vorbehandlung mit 1M $BaCl_2$ -Lösung besetzte Ba fast alle Austauscherpositionen. Aufgrund der hohen Bindungsstärke des Al sind jedoch auch zu einem gewissen Anteil noch Al-Ionen austauschbar vorhanden. Die Ba-Messungen in den Versuchslösungen nach der ersten zehn Tagen ergaben Ba-Konzentrationen um 40mg/l; diese auffallend hohen Werte sind wahrscheinlich zumindest teilweise auf unzureichendes Aus-

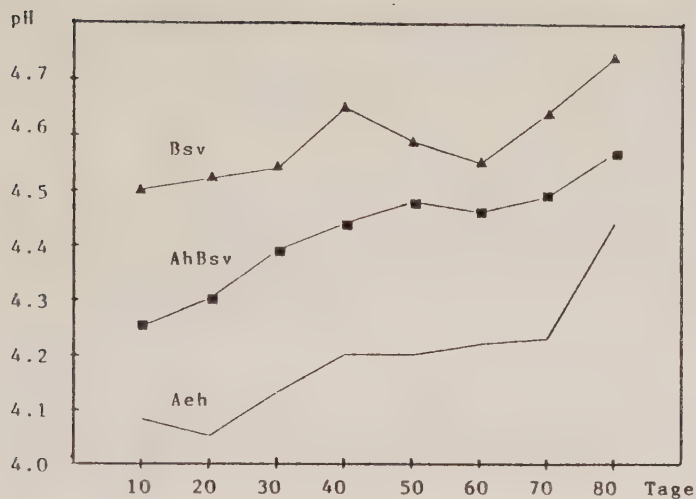


Abb. 5.12.a.: pH-Werte in den Extrakten des sequentiellen Batch-Versuches mit unbehandelten Proben des Pedons I/B nach Zugabe von $10^{-4}M$ Zitronensäure (Vorversuch).

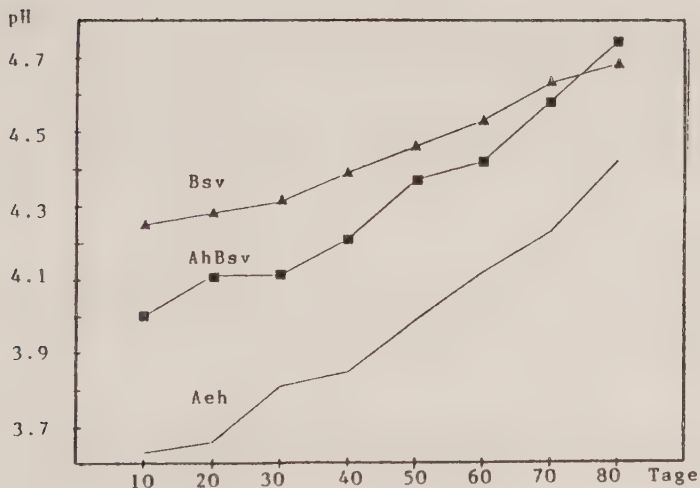


Abb. 5.12.b.: pH-Werte in den Extrakten des sequentiellen Batch-Versuches mit vorbehandeltem Boden des Pedons I/B nach Zugabe von $10^{-4}M$ HNO_3 (Hauptversuch).

waschen der Proben nach der BaCl_2 -Vorbehandlung zurückzuführen. Somit fand in den Gefäßen mit HNO_3 -bzw. Zitronensäurezusatz weiterhin ein Eintauch von Ba aus der Lösung statt. Dabei wurde das restliche, an den Austauschern befindliche Al freigesetzt, wofür auch die hohen Al-Anfangskonzentrationen in den Lösungen des Hauptversuches sprechen (Abb. 5.15.). Die mit 6 H_2O -Molekülen hydratisierten Al-Ionen unterliegen der Hydrolyse und tragen so zur pH-Erniedrigung in den Suspensionen mit vorbehandeltem Probenmaterial bei. Außerdem führte

-das noch in der Reaktionslösung des Hauptversuches vorhandene Ba zur Fällung organischer Stoffe als metallorganische Komplexe. Durch die Bindung des Metalls an die organischen Liganden (COOH- und phenolische Gruppen) werden Protonen an die Lösung abgegeben. Diese Fällung organischer Stoffe wird durch die im Vergleich zum Vorversuch deutlich niedrigeren Konzentrationen an Huminstoffen belegt (vgl. Abb. 5.13.). Die Abweichung war wiederum besonders groß für die humusreichen Horizonte.

So tragen im Hauptversuch zu dem kontinuierlichen Ansteigen des pH-Wertes in den Lösungen im Verlauf von 80 Tagen neben den sich verändernden Redoxbedingungen (vgl. Vorversuch) auch die im Laufe der Zeit geringer werdenden Salz-Konzentrationen (nach 40 Tagen nur noch 1-2mg Ba/l) und der Rückgang des in die Lösung ausgetauschten Al-Anteils bei.

5.4.2. Huminstoffe

Die Extinktion der Extrakte bei einer Wellenlänge von 320 nm dient als Maß für ihre Konzentration an Huminstoffen. Da die Huminstoffe sowohl aus den mit Wasser als auch aus den mit verschiedenen Säuren versetzten Bodenproben in Lösung gehen, dürfte es sich vorwiegend um Fulvosäuren handeln (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 1984), was mit der bodengenetischen Stellung der Pedons im Einklang steht. Auch hier waren die Huminstoffkonzentrationen in den Extrakten der Versuchstermine unabhängig von der Art der eingesetzten Reagenzien für die einzelnen Bodenhorizonte sehr ähnlich, so daß in Abb. 5.13. jeweils für Vor- und Hauptversuch nur eine Behandlungsvariante dargestellt ist.

Im Vorversuch variierten die extrahierten Huminstoffmengen für den humusreichen Aeh-Horizont des Pedons I/B (Podsol-Braunerde) am Lakenberg sehr stark und waren im tieferen Mineralboden sehr gering. Im Hauptversuch mit vorbehandeltem Bodenmaterial kam es dagegen nach einer anfänglichen Abnahme gegen Versuchsende zu einem deutlichen Anstieg (Abb. 5.13.).

Diese im Haupt- und Vorversuch für den Aeh nach 60 Tagen beobachtete Zunahme extrahierter Huminstoffe scheint ebenfalls auf veränderte Redoxpotentiale im System hinzuweisen. Deren Abnahme ist dort am stärksten, wo hohe Humusgehalte im Boden und Extrakt auftreten. In humusarmen Ae- und B-Horizonten nehmen die Konzentrationen an wasser-

Extinktion (320 nm)

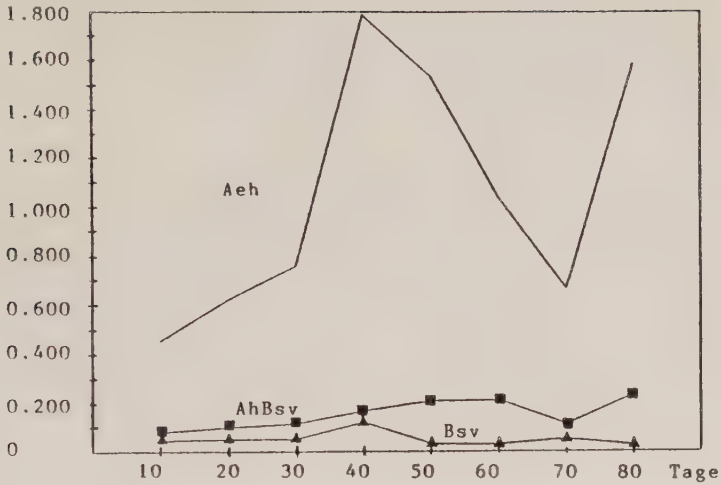


Abb.5.13.a.: Huminstoffkonzentrationen in den Extrakten des Batch-Versuches mit unbehandelten Proben des Pedons I/B nach Zugabe von 10^{-4} M HNO_3 (Vorversuch).

Extinktion (320 nm)

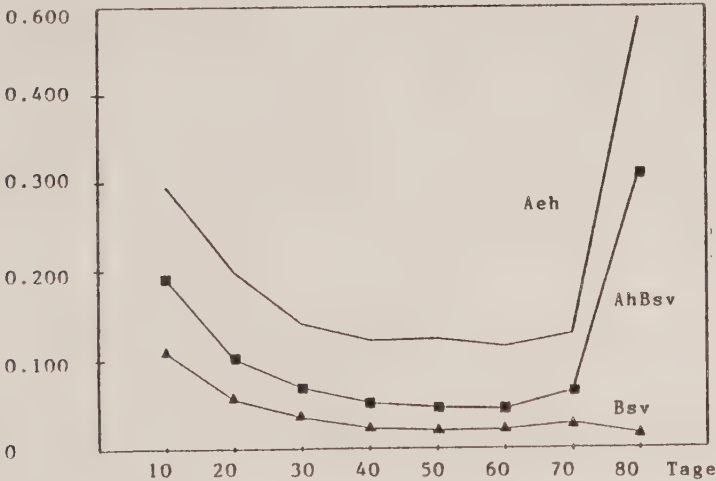


Abb.5.13.b.: Huminstoffkonzentrationen in den Extrakten des Batch-Versuches mit vorbehandeltem Boden des Pedons I/B nach Zugabe von 10^{-4} M Zitronensäure (Hauptversuch).

und säurelöslichen Huminstoffen in den Versuchslösungen dagegen während des Experimentes ab (vgl. Tab.A.25.). Eine Korrelation zwischen der Extinktion und gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC), wie sie in Bodenlösungen aus sauer berechneten Waldböden festgestellt wurde (GÖTTLEIN 1988), konnte nicht überprüft werden, da die Bestimmung von DOC infolge der Zugabe von Toluol zur Vermeidung mikrobieller Umsetzung nicht möglich war.

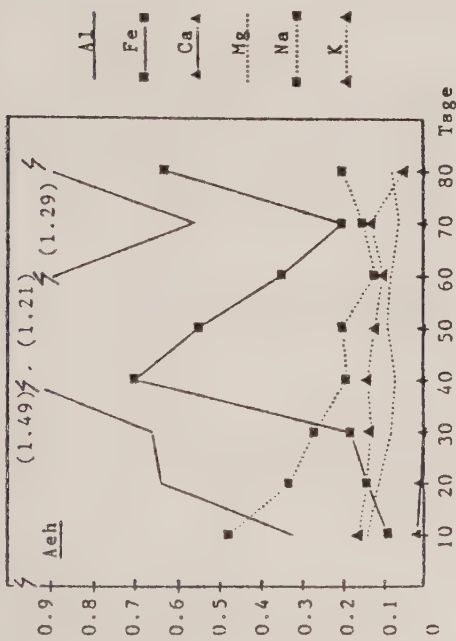
Die durch Ansteigen der Extinktion gekennzeichnete Mobilisierung von Huminstoffen vor allem in humusreichen Horizonten und die daraus resultierende Änderung des Redoxpotentials wurde auch im Rahmen einer Diplomarbeit am Lehrstuhl für Bodenkunde beobachtet. In Extrakten ungestörter Bodenproben, die in einem Dialyseschlauch über mehrere Wochen wassergesättigt waren, nahmen i.d.R. nach 40 Tagen die Extinktionen zu, zeitlich verzögert gefolgt von einem Anstieg der Fe, Mn und z.T. auch der Al-Konzentrationen (pers. Mitt. ZULEGER 1988) und zwar um so deutlicher, je humusreicher die untersuchten Bodenhorizonte waren. Die Freisetzung von Fe, Al und Mn trat im sequentiellen Batch-Versuch nur bei Proben auf, die im Experiment eine besonders starke Freisetzung von Huminstoffen aufwiesen (vgl. Abb.5.16.a.-c.). Bei längerer Versuchsdauer wäre dieser Effekt wahrscheinlich auch bei anderen Proben zu beobachten gewesen.

5.4.3. Al- und Fe-Freisetzung

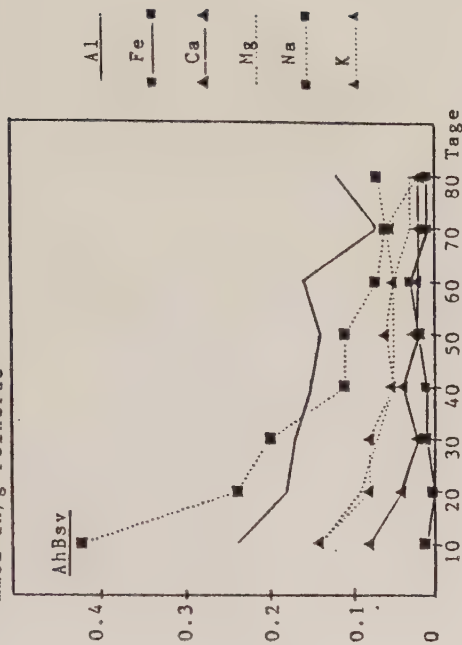
Im Vorversuch trat eine enge Korrelation zwischen den Gehalten an wasser- und säureextrahierbarem Al und den Huminstoffen (Extinktionswerte bei 320 nm) im Extrakt während des Versuchsverlaufes nur für den Aeh-Horizont auf ($r=0.89$ für H_2O und Zitronensäurezugabe, $r=0.98$ bei HNO_3 -Behandlung). Im Hauptversuch mit vorbehandelten Proben desselben Pedons (I/B am Lackenberg) konnte dagegen bei allen drei untersuchten Horizonten für die HNO_3 - und Zitronensäure-Extrakte ein ziemlich strenger Zusammenhang zwischen säureextrahierbarem Al und den Huminstoffen nachgewiesen werden (Aeh- $r=0.89$; AhBsv- $r=0.96$; Bsv- $r=0.64$). Für die Mineralbodenhorizonte der Pedons I/A (Lackenberg), III/A und C (Rachel), IV/B und D (Lusen) und V/C und D (Hoher Bogen) fand sich jedoch kein derartiger Zusammenhang. In jenen Horizonten, in denen eine hohe Al-Freisetzung in den Extraktionslösungen niedriger Huminstoffkonzentrationen gegenüber steht (z.B. Pedon I/A, Tab.A.25), sind Al-Hydroxo-Sulfate als Al-Quelle nicht auszuschließen.

In beiden Experimenten beobachteten wir ähnlich enge Zusammenhänge zwischen dem jeweils mobilisierten Fe und den gelösten organischen Stoffen. Diese Korrelationen sprechen dafür, daß ein erheblicher Teil des in den Versuchslösungen vorliegenden Fe und auch des Al in organischen Verbindungen (Chelaten) steckt. Die strengen Korrelationen bestehen für die entsprechenden Horizonte aller untersuchten Pedons allerdings nur solange, als der erwähnte Wiederanstieg der Huminstoffkonzentrationen im Extrakt gegen Versuchsende noch nicht eingesetzt hat (d.h. die Resultate der letzten Meßtermine sind in die Korrelationsberechnungen nicht eingegangen).

mmol IÄ/g Feinerde



mmol IÄ/g Feinerde



mmol IÄ/g Feinerde

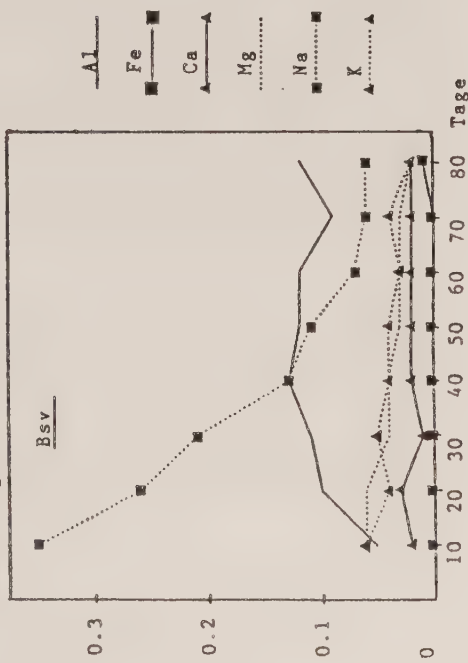


Abb. 5.14. a.-c.: Elementgehalte in den Extrakten des sequentiellen Batch-Versuches mit unbehandeltem Boden des Pedons I/B nach Zugabe von 10^{-4} M HNO_3 .

Während im Vorversuch die extrahierten Al- und Fe-Gehalte im Aeh innerhalb der 80 Versuchstage bei Wasser- und Säurezugabe sehr stark variierten (vgl. Abb. 5.14.), nahmen sie nach Vorbehandlung mit BaCl_2 im Laufe der Versuchsdauer kontinuierlich ab (vgl. Abb. 5.15.). In den B-Horizonten herrschte dagegen in beiden Versuchen dieselbe Kinetik vor.

Die Unterschiede für die Aeh-Horizonte sind wie folgt zu erklären:

-VORVERSUCH (vgl. Abb. 5.14.): Im humusreichen Aeh-Horizont wird die Mobilisierung von Fe und Al durch Wasser- und Säure (10^{-4}M HNO_3 sowie $10^{-4}\text{M Zitronensäure}$) v. a. durch die Auflösung organischer Stoffe bestimmt. Austauschvorgänge treten zurück und die Rest-Silikate werden infolge des anscheinend zu geringen Protonendruckes kaum angegriffen.

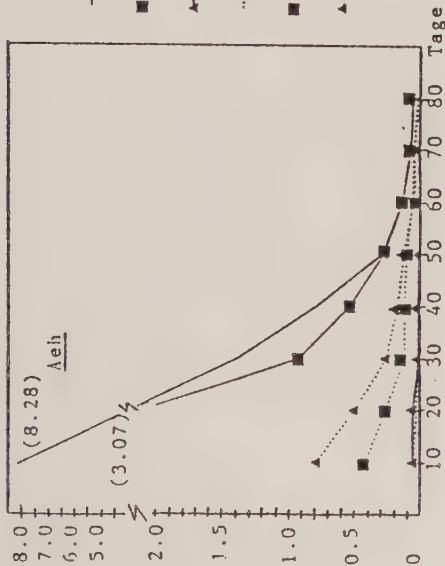
-HAUPTVERSUCH (vgl. Abb. 5.15.): Die hohen Al- und Fe-Gehalte der ersten Extraktionstermine in allen untersuchten Horizonten der Pedons aus verschiedenem Ausgangsgestein sind durch die BaCl_2 -Vorbehandlung zu erklären. Da die BaCl_2 -Lösung einen pH-Wert von 5.2 hatte, wurde das durch Ba verdrängte, ausgetauschte Al (Fe) zum großen Teil als Hydroxid gefällt, und diese Hydrolyseprodukte gingen später durch Säureextraktion (10^{-4}M HNO_3 bzw. $10^{-4}\text{M Zitronensäure}$) in der ersten Versuchsphase in Lösung. Die gleichzeitig hohen Ba-Konzentrationen im Extrakt (durch Rücktausch des Ba sowie durch unzureichende Auswaschung bedingt) können darüber hinaus auch noch restliches austauschbares Al verdrängt haben. Weiter weist die hohe Huminstoffkonzentration im Extrakt zu Beginn des Hauptversuches darauf hin, daß auch Al (Fe)-Chelate mobilisiert wurden. Außerdem ist nicht auszuschließen, daß bei den niedrigen pH-Werten (pH 4 in den Oberbodenhorizonten) zu Beginn des Hauptversuches auch nicht austauschbare polymere Al-Hydroxykationen aus den Zwischenschichten aufgeweiteter Vermikulite (vgl. Kap. 5.3.2.) teilweise gelöst wurden.

Die Extraktion von Fe und Al nach Zugabe von HNO_3 und Zitronensäure unterscheidet sich nur für humusarme Horizonte. Hier steigen in beiden Extrakten zu Versuchsende die extrahierten Huminstoffe wieder an, und parallel dazu nehmen auch die mobilisierten Al- und Fe-Gehalte wieder zu (Abb. 5.16.a.-c.). Der Anstieg ist jedoch nach Zitronensäure-Zugabe viel ausgeprägter als bei Salpetersäureextraktion. Dieser Befund stimmt mit den Ergebnissen von GÖTTLEIN (1988) überein, wonach Al besonders stark durch organische Säuren wie Zitronensäure und Oxalsäure komplexiert wird.

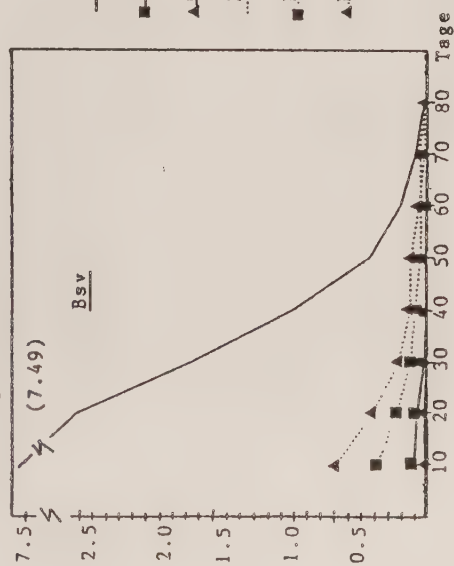
Bei der Fraktionierung von Al und Fe in eine stabile und eine labile Form mittels eines Na-gesättigten Austauschharzes (nach VERLOO und COTTENIE 1972) fand ich im Vorversuch eine enge Korrelation zwischen gelösten Huminstoffen und dem als Komplex gelösten Al in den Extrakten nach 10, 40 und 80 Tagen (Aeh-r=0.98; AhBsv-r=0.78; Bsv-r=0.80), und zwar unabhängig von Wasser- oder Säurezusatz.

Bei den vorbehandelten Bodenproben im Hauptversuch war diese Beziehung nicht in allen Mineralbodenhorizonten deutlich, da die Konzentrationen an komplexiertem Al oft unter der Nachweisgrenze lagen. Auch hier

mmol IÄ/g Feinerde



mmol IÄ/g Feinerde



mmol IÄ/g Feinerde

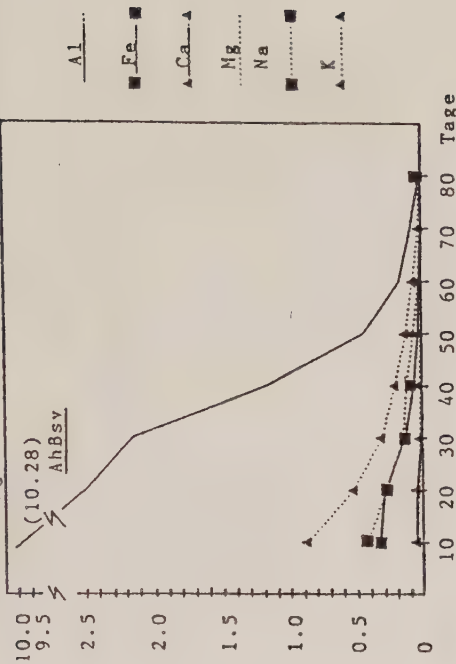


Abb.5.15.a.-c.: Elementgehalte in den Zitronen-säure-Extrakten aus verschiedenen Bodenhorizonten des Pedons I/8 nach Vorhandlung mit 1M BaCl₂ (Hauptversuch).

scheint die Vorbehandlung mit 1M BaCl_2 -Lösung eine nicht zu vernachlässigende Störung für das Batch-Experiment bewirkt zu haben.

Die extrahierten Al- und Fe-Gesamtgehalte für die Versuchsdauer von 80 Tagen verdeutlichen wiederum den Zusammenhang zwischen mobilisiertem Fe und Al und den Humusgehalten der untersuchten Horizonte-unabhängig vom Ausgangsgestein (Tab.5.9. und Tab. 5.10.). Im Vergleich zum Vorversuch sind die Al- und Fe-Gesamtgehalte des Pedons T/B im Hauptversuch doppelt so hoch. Dies ist wiederum durch die BaCl_2 -Vorbehandlung bedingt: Das durch Ba verdrängte und ausgetauschte Al und Fe wurden bei dem hohen pH-Wert der Austauschertlösung zum großen Teil als Hydroxid gefällt; diese Hydrolyseprodukte gingen durch Säureextraktion in den ersten Versuchsphasen in Lösung und erklären die hohen Al- und Fe-Gesamtgehalte nach 80 Tagen im Hauptversuch. Im Vorversuch ist die Mobilisierung von Al und Fe allein vorwiegend durch die Auflösung organischer Stoffe bestimmt und liegen dementsprechend niedriger (vgl. Tab.5.9.).

Die extrahierten Al-Gesamtgehalte liegen in den Pedons aus saurem Ausgangsgestein (Glimmerschiefer/Paragneis, Paragneis, Granit) im Hauptversuch in humusreichen Horizonten höher als in vergleichbaren Horizonten der Pedons aus Amphibolit (Tab.5.10.). Dieser Befund ist mit der unterschiedlichen Al-Sättigung zu erklären, die in den humusreichen Mineralbodenhorizonten der Granit-, Glimmerschiefer- und Paragneisstandorte deutlich über 70% liegt, während sie auf Amphibolit in den Aeh-Horizonten zwischen 55 und 70% variiert. Durch die BaCl_2 -Vorbehandlung kann in den entsprechenden Horizonten der Amphibolit-Pedons weniger Al durch Ba verdrängt werden und als Hydroxid ausfallen. Somit stehen dem Säureangriff durch Zugabe von 10^{-4}M HNO_3 bzw. 10^{-4}M Zitronensäure weniger Al-Hydrolyseprodukte gegenüber als in vergleichbaren Horizonten der Pedons aus saurem Ausgangsgestein.

5.4.4. Ca-, Mg-, Na- und K-Freisetzung

Die im Vor- und Hauptversuch extrahierten Ca-, Mg-, Na- und K-Gehalte sind ähnlich den Al- und Fe-Gehalten in den humusreichen Horizonten der meisten Pedons (Ausnahme IV/B und D) höher als im Unterboden (vgl. Tab.5.9. und 5.10.). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, daß die Silikate hier stärker durch organische Säuren angegriffen und daher für die verwendeten Reagenzien leichter zugänglich sind. Für Ca, das an Huminstoffe fest gebunden sein kann, mag auch eine Mobilisierung von Ca-Komplexen zu den höheren Gehalten beitragen. Da die meisten untersuchten Horizonte relativ hohe Humusgehalte aufweisen und von Wässern mit Huminstoffen kräftig durchspült werden, sind die Silikate ständig dem Angriff von Chelatoren ausgesetzt. Dieses bodeneigene Potential an Chelatoren wird deshalb kaum durch die Zugabe von Zitronensäure im sequentiellen Batch-Versuch verstärkt. Deshalb lösen Salpeter- und Zitronensäure annähernd gleiche Mengen von Basen-Kationen wie auch von Al und Fe (außer Profil III/A, Abb.5.16.).

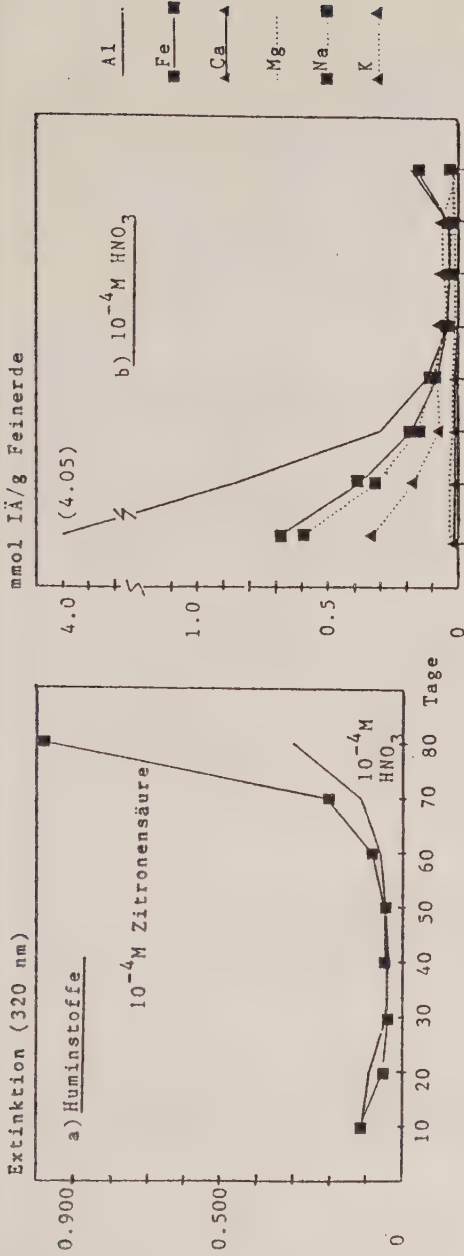
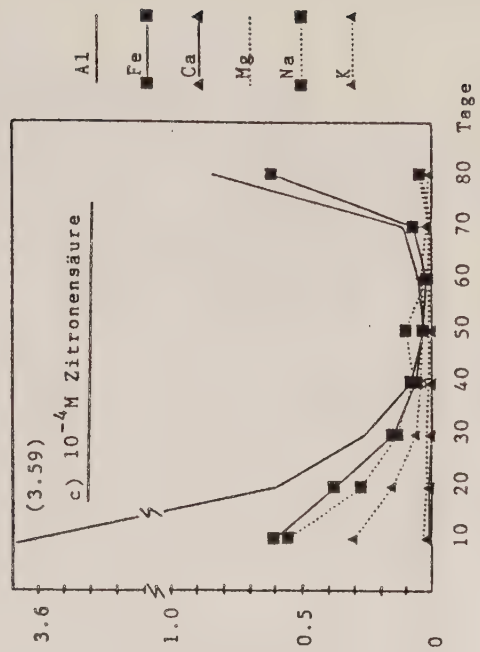
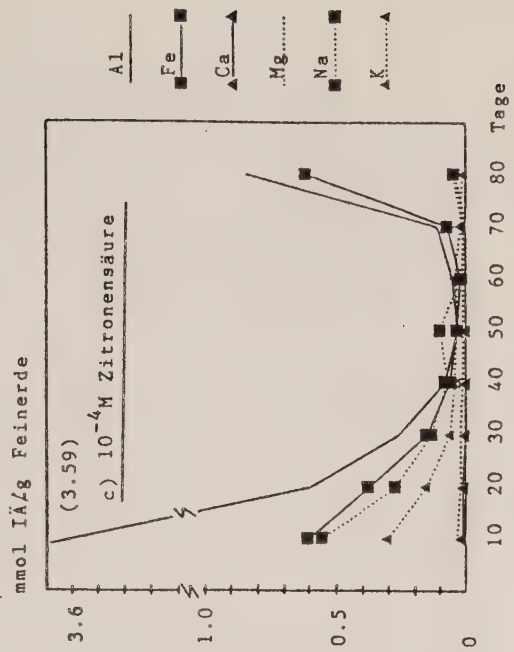


Abb. 5.16 a-c: Vergleich zwischen der Freisetzung von Huminstoffen und Metallen durch 10^{-4} M HNO_3 und Zitronensäure aus dem Bsv-Horizont des Pedons III/A am Rachel (Paragneis). Hauptverh. such.



Horizont	Humus- gehalt %	Al			Fe			Ca $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$			Mg			Na			K		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Aeh	14.6	63.4/73.6/72.6			53.2/62.5/59.7			1.2/0.7/3.3			8.7/0.1/8.6			44.4/43.0/42.7			37.7/40.2/43.8		
AhBsv	13.1	11.1/13.1/13.5			1.8/ 6.7/ 6.7			5.2/3.1/5.2			6.1/5.0/5.5			29.5/32.7/29.9			21.5/23.2/29.5		
Bsv	8.1	7.4/ 6.3/ 6.4			0.2/ 0.3/ 2.4			2.6/2.6/2.7			3.1/3.9/3.7			20.3/32.4/20.3			9.7/14.6/12.0		

Tab.5.9.: Gesamtgehalte an extrahierten Elementen ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) im Vorversuch (unbehandelter Boden) für das Pedon I/B (Lackenberg, Glimmerschiefer/Paragneis).

a= aqua dest.

b= 10^{-4}M HNO_3

c= $10^{-4}\text{M Zitronensäure}$

Verhältnis Boden:Lösung=1:1

In den Abb.5.14. und 5.15. sind aus diesem Grund die Element-Gehalte der Extrakte an den Versuchsterminen nur für eine Behandlungsvariante sowohl für den Vor- als auch für den Hauptversuch dargestellt.

Die extrahierbaren Ca-Gehalte liegen im Vorversuch für die humusreichen Horizonte zu Versuchsbeginn bei $1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ bzw. $0.05\text{ mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ /g Feinerde (Abb.5.14.) und sind nach ca. 40 Tagen an der Nachweisgrenze. Das gleiche gilt für die vorbehandelten Bodenproben (Abb.5.15.). Da Ca bevorzugt an organische Stoffe gebunden wird, sind die höheren extrahierbaren Ca-Gehalte in den humusreichen Horizonten auch durch Mobilisieren von Ca-Humaten zu erklären.

Die Freisetzung von Ca ist unter der gewählten Versuchsbedingungen Überraschenderweise für die Böden aus ultrabasischem Ausgangsmaterial (Amphibolit) nicht größer als für die Böden aus saurem Muttergestein. Für den Vorversuch ist dies verständlich angesichts des Befundes, daß in allen untersuchten Pedons die Ca-Sättigung an den Austauscheroberflächen ähnlich niedrig ist; aufgrund der geringen H^+ -Ionenkonzentrationen der zugesetzten Lösungen (dest. H_2O , 10^{-4}M HNO_3 , $10^{-4}\text{M Zitronensäure}$) fanden überwiegend Austauschvorgänge zwischen Boden und Lösung statt. Es erfolgte keine nennenswerte Freisetzung von Ca aus Silikaten (vgl. KAUFENJOHANN et al. 1987).

Durch die Vorbehandlung mit BaCl_2 wurde sicherlich der größte Teil des austauschbaren Ca gegen Ba eingetauscht. Daher leiten die sich hier im Hauptversuch durch Säurezusatz mobilisierten Ca-Gehalte vorwiegend aus Silikatverwitterung und bis zu einem gewissen Grad auch aus der Auflösung von Ca-Humaten ab. Unabhängig vom Ausgangsgestein ist die Ca-Freisetzungsrates auffallend niedrig; eine stärkere Differenzierung nach dem Gestein wäre wohl durch Einsetzen höherer Säurekonzentrationen zu erreichen (vgl. SÜSSER 1987).

Für Mg, das an den Austauscheroberflächen weniger fest gebunden wird als Ca und nur in geringem Ausmaß Verbindungen mit organischen Stoffen eingeht, können die in der Versuchslösung des Hauptversuchs auftre-

Standort/ Horizont	Humus- gehalt %	Al	Fe		Ca		Mg		K		Na	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
								$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$				
Gl immer-												
schiefer/												
Profil I/B												
Aeh	14.6	117.8	123.1	128.6	134.1	3.6	3.6	2.1	1.8	74.2	25.4	25.9
ABhsv	13.1	141.9	166.2	16.3	17.4	2.7	2.7	1.7	1.7	78.0	23.5	25.6
Bsv	8.1	123.3	122.9	5.2	4.7	1.5	1.4	1.1	1.0	66.0	23.0	22.5
Profil I/A												
Ae	2.7	11.6	15.4	27.4	38.3	0.8	0.6	0.5	0.6	40.4	38.7	14.3
Bsh	17.1	169.7	157.2	110.6	111.6	1.3	1.8	0.6	0.7	63.0	60.1	21.3
Bsv	1.7	25.8	38.6	4.6	9.9	0.3	0.3	0.6	1.0	28.6	25.5	9.9
Gneis/												
Profil III/A												
GoAhe	4.8	50.5	49.8	29.1	35.6	0.7	0.7	1.6	1.9	49.7	46.8	18.1
Bsv	2.6	32.2	46.0	7.5	19.5	0.5	0.6	1.1	1.7	30.8	29.2	11.0
Bv	1.7	17.5	31.5	2.1	8.4	0.3	0.3	0.6	1.0	25.2	23.7	9.6
Profil III/C												
Ahe	20.8	196.5	179.9	45.6	44.8	3.9	4.0	3.2	3.0	119.3	149.6	36.3
Bvs	14.5	106.5	98.3	30.5	30.3	2.1	1.6	1.8	1.4	72.6	67.9	51.0
Bsv	6.4	52.0	51.7	9.3	10.5	0.6	0.9	1.4	1.5	46.5	46.9	15.9
Granit/												
Profil IV/B												
Ae	3.4	9.1	7.4	6.4	6.0	0.9	1.0	0.9	0.8	50.4	43.0	15.8
Bsh	13.6	119.5	94.2	124.3	111.4	1.0	0.8	1.0	0.8	57.0	52.0	20.5
Bs	12.4	82.4	84.8	49.0	56.5	0.8	0.9	0.5	0.5	46.2	55.7	17.9
Profil IV/D												
A e h	31.0	314.6	319.2	44.9	51.7	5.2	5.1	1.9	1.8	125.4	137.1	46.3
Bsv	12.9	103.9	76.7	11.5	10.9	2.2	2.1	1.0	0.8	78.8	67.9	26.2
SwBsv	7.7	59.2	54.5	5.5	7.2	1.5	1.4	0.8	0.8	63.5	63.5	22.9
Amphibolit/												
Profil V/C												
Aeh	13.3	52.7	52.8	119.6	134.8	3.0	3.2	2.2	2.1	62.3	56.4	30.7
Bsv	9.6	59.2	54.7	5.5	5.1	2.3	3.3	1.1	1.1	49.0	46.3	17.9
Bv	5.2	24.9	29.2	2.6	2.0	0.9	1.3	0.5	0.7	25.7	28.6	10.3
Profil V/D												
Aeh	12.1	59.1	51.6	67.7	74.3	2.9	3.4	2.2	2.2	50.8	49.4	18.9
B(s)v	9.1	51.9	63.9	3.5	3.5	1.4	1.9	0.8	0.9	39.0	48.4	14.5
Bv	5.3	41.1	39.9	2.7	3.4	1.1	1.2	0.7	0.8	34.2	35.0	13.8

Tab.5.10.: Gesamtgehalte an extrahierten Elementen ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) ausgewählter Bodenformen im Hauptversuch (BaCl₂-Vorbehandlung): a=10⁻⁴ M HNO₃; b=10⁻⁴ M Zitronensäure; Verhältnis Boden:Lösung=1:1.

tenden Gehalte als Freisetzung aus Silikaten interpretiert werden. Auch die Freisetzung von Mg aus silikatischer Bindung ist in allen Bodenformen und auf allen Gesteinstypen nach 80 Versuchstagen ähnlich niedrig (Tab. 5.10.). Um eine gesteinsbedingte Differenzierung zu erreichen, müßten auch hier höhere Säurekonzentrationen der Versuchslösungen angewendet werden.

Im Vorversuch lagen die mobilisierten Mg-Gehalte, unabhängig vom Versuchsmedium, ca. vierfach so hoch wie nach Vorbehandlung im Hauptversuch (vgl. Tab. 5.9. und 5.10.), da im ersten Fall das austauschbare Mg miterfasst wurde.

Für Na und K, die beide nur schwach austauschbar gebunden werden, liegen die mobilisierten Gehalte schon im Vorversuch deutlich über jenen von Ca und Mg und zwar sowohl nach Wasser- als auch nach Säurezusatz (Abb. 5.14.). Bei den mit Ba belegten Proben im Hauptversuch geht nach Säurezugabe bevorzugt K in Lösung (Abb. 5.15.). Dies spricht für eine hohe K-Freisetzungsrates aus Glimmern, Illiten und Alkalifeldspäten; denn man kann davon ausgehen, daß K und Na durch die Vorbehandlung vollständig gegen Ba ausgetauscht wurden.

Während der Versuchsdauer gehen die Extraktausbeuten von K und Na ebenso wie jene von Ca und Mg ständig zurück. Dieser Abfall ist so zu deuten, daß die im Versuch simulierte chemische Verwitterung bei zu Beginn niedrigen pH-Werten oberflächennahe K- und Na-Ionen freisetzt. Später lassen sich auch durch Zugabe von $10^{-4}M$ HNO_3 bzw. Zitronensäure aus den verarmten Mineralschichten nur noch geringe Alkalimetallmengen extrahieren. Diese Extraktion darf man sich jedoch nach den Ergebnissen von HOLDREN et al. (1979), BERNER et al. (1980) und SCHOTT et al. (1987) nicht als eine die ganze Mineraloberfläche gleichmäßig betreffende Reaktion zwischen Festsubstanz und Lösung vorstellen. Zahlreiche Beobachtungen in Laborversuchen führten zu der Annahme, daß das Herauslösen der Kationen aus dem Silikatgitter bevorzugt an Stellen höherer Energie (z.B. Gitterstörungen, Spaltrisse usw.) vorstatten geht und somit nur einen kleinen Teil der Mineraloberfläche erfasst. Diese "Defektstellen" sind hervorragende Eindringbahnen für Wassermoleküle und H^+ -Ionen. Ein solches Eindringen von Protonen, verbunden mit einem oberflächennahen Herauslösen von Na, wurde bei Albitkristallen beobachtet (SCHOTT et al. 1987).

Zwar unterscheiden sich die Horizonte in der K-Freisetzungsrates über 80 Tage einigermaßen deutlich, wobei die höchsten Werte wiederum in den A-Horizonten auftreten; gesicherte Differenzen zwischen den Bodenformen und Gesteinen sind jedoch nicht erkennbar (Tab. 5.10.). Dieses Ergebnis überrascht, sind doch in den Vergleich Glimmer- und Kalifeldspatarme bzw. -freie Gesteine (Amphibolit) und Glimmer- und K-Feldspatreiche Substrate (Paragneis und Granit) einbezogen. Wahrscheinlich sind diese K-Freisetzungsrates bei der gewählten, geringen Säurekonzentration ($10^{-4}M$) so niedrig, daß sich substratbedingte Unterschiede verwischen.

Auch für die Na-Gehalte zeigt sich im Hauptversuch keine substratbedingte Differenz in der Freisetzung aus Silikatverwitterung. Na liegt in allen Bodenformen in den verwitterungsanfälligeren Plagioklasen

vor, die wechselnde Anorthit-Gehalte besitzen. Die Plagioklase sind auf Granit, Paragneis und Glimmerschiefer/Paragneis in der Feinerde nur mit weniger als 10% vertreten, dafür aber Na-reicher (Anorthit-Gehalt 25%); die Leichtmineralfraktion des Bodens aus Amphibolit enthält dagegen ca. 30% Plagioklase, die jedoch nur halb so hohe Albit-Gehalte aufweisen (Anorthit-Gehalt 35-59%, vgl. Kap.5.3.1.). Dieses Verteilungsmuster trägt sicher dazu bei, daß wir für alle untersuchten Horizonte auf unterschiedlichem Ausgangsgestein ähnliche Na-Freisetzungsraten beobachteten (Tab.5.10.).

5.5. Diskussion der Untersuchungsbefunde zur Erfassung des Bestandes und der Verwitterung von Silikaten

5.5.1. Mineralogische Ergebnisse

Die Schwermineralverteilung der vier untersuchten Pedons aus verschiedenem Gestein (Granit, Paragneis, Glimmerschiefer/Paragneis und Amphibolit) läßt in keinem Fall eine Unterscheidung zwischen Haupt- und Basisfolge zu. Da in der Hauptfolge keine erhöhten Feinsand- und Grobschluff-Anteile auftreten, und die Leichtmineralfraktion keinen Verdünnungseffekt durch erhöhte Quarzgehalte zeigt, liegen zumindest keine mengenmäßig erheblichen Lößeinwehungen in der Hauptfolge vor. Beim Vergleich der eigenen Ergebnisse mit jenen von DILL und ZECH (1980) kann jedoch ein untergeordneter Anteil von Fernläß für den Podsol am Lusen (IV/B) in allen Straten der Schuttfolge nicht ausgeschlossen werden. Insgesamt ist in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes im Vergleich zu anderen Mittelgebirgsregionen jedoch keine Differenzierung zwischen Haupt- und Basisfolge infolge Lößeinwehung möglich (vgl. SCHILLING und WIEFEL 1962; SEMMEL 1964; MAUS und STAHR 1977; STAHR 1979; FRIED 1984). Die beiden Straten unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Gefüges, nicht aber in der Mineralführung.

Der in der podsoligen Braunerde aus Amphibolit mit 60-65% weit höhere Schwermineral-Gehalt gegenüber Böden aus saurem Gestein (4-7%) entfällt zu über 80% auf eine Fe- und Mg-reiche Hornblende. Diese ist jedoch in der Feinsandfraktion angereichert und somit der chemischen Verwitterung nur wenig zugänglich, da diese vorwiegend an kleineren Korngrößen ansetzt. Der Beitrag dieses Minerals zur Silikatpufferung dürfte deshalb nur gering sein. Aus diesem Grunde liegen die pH-Werte dieses Pedons im mäßig bis stark sauren Bereich wie jene der Böden aus saurem Ausgangsgestein. Deshalb dominiert auch auf ultrabasischem Gestein das Al an den Austauscheroberflächen, und die Gehalte an austauschbarem Mg und Ca sind äußerst gering, obwohl die Gesamtgehalte beider Elemente in der Feinerde zehnmal größer sind als in den Podsol-Braunerden, Braunerde-Podsolen und Podsolen aus Granit und Paragneis. Diese höheren Gehalte wiederum beruhen aber nicht nur auf dem Vorherrschen der Mg-reichen Hornblende in der Feinsand-Fraktion, sondern auch auf den Überlegenen Anorthit-Gehalten (36-59% gegenüber ca. 25%) der Plagioklase; Quarze und Ca-reiche Plagioklase sind die wichtigsten Leichtminerale der Feinerde aus Amphibolit.

In den Böden aus Gneis werden die Schwerminerale durch Almandin ($\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$) und Sillimanit ($\text{Al}_2(\text{SiO}_4)$) repräsentiert, am Lusen (Granit) dominiert Zirkon ($\text{Zr}(\text{SiO}_4)$), gefolgt von Hornblende ($(\text{OH}, \text{F})_2\text{X}_2\text{Y}_5\text{Z}_6\text{O}_{22}$ mit $\text{X}=\text{Ca}, \text{Na}, \text{K}$ aber auch $\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}$; $\text{Y}=\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Ti}$; $\text{Z}=\text{Si}, \text{Al}$) und Apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$). In der Leichtmineral-Fraktion treten vorwiegend Quarze und Glimmer neben Alakifeldspäten auf. Plagiochlore sind i.d.R. mit weniger als 10% beteiligt. So liegen zwar für die Pufferung des Bodens auf diesen Standorten noch in allen Horizonten ausreichende Mengen an Silikaten vor, doch sind diese vorwiegend Ca- und Mg-arm.

Diese Armut der Böden im Untersuchungsgebiet an austauschbarem und durch Verwitterung leicht nachlieferbarem Ca und Mg ist wohl keine "neuartige" Erscheinung, sondern liegt wahrscheinlich seit Beginn der holozänen Bodenbildung vor. Aufgrund der in jüngeren Zeit wahrscheinlich erhöhten Protoneneinträge (pH-Wert im Sickerwasser aus dem Auflagehumus nach der Schneeschnelze=3.2, pers. Mitt. HEIL 1988; Eintrag mit der Kronentraufe $1,5 \text{ kg H}^+ \times \text{ha}^{-1} \times \text{a}^{-1}$, $44 \text{ kg SO}_4\text{-S}$ und $11 \text{ kg NO}_3\text{-N} \times \text{ha}^{-1} \times \text{a}^{-1}$, vgl. Kap. 2.4.1.) kann es jedoch zu einer zusätzlichen anthropogenen Basenverarmung kommen. Zudem sind vorwiegend reaktive Al-Hydroxy-Verbindungen für eine schnelle Protonenpufferung in sauren Böden verantwortlich, da die Kinetik der Silikatverwitterung nur äußerst langsam ist (HARTIKAINEN 1986).

Nach Untersuchungen von ROBERT et al. (1979) führen Mineralsäuren bei Glimmern im Gegensatz zu organischen Säuren, die den totalen Zusammenbruch silikatischer Strukturen induzieren, zur Bildung aufgeweiteter Vermikulite mit Al-Hydroxy-Kationen-Zwischenschichtbelegung. Da diese Art von Vermikuliten in den Oberbodenhorizonten aller tonmineralogisch untersuchten Pedons auftreten und aus Wasseranalysen eine enge negative Korrelation zwischen pH-Wert und Sulfat-Gehalt in den durch die Hauptfolge perkolierten Quell- und Bachwässern nachgewiesen ist (FÖRSTER 1988), ist ein Einfluß der durch den Niederschlag eingebrachten anthropogenen Mineralsäuren auf das Verwitterungsgeschehen wahrscheinlich.

Die Tonminerale spielen bei der gegenwärtigen Beurteilung depositionsbedingter Bodenversauerung nur eine untergeordnete Rolle. BLUM et al. (1987) zeigten jedoch deutliche Veränderungen in der Tonmineralfraktion in Abhängigkeit von der Intensität der Immissionswirkung. Auch die im Rahmen der eigenen Studie aufgezeigten, möglicherweise säurebedingten Strukturveränderungen insbesondere der für die Kationen-Austauschkapazität wichtigen Dreischichtminerale sollten zukünftig nicht unbeachtet gelassen werden.

Die Analysergebnisse zur Neubildung und Transformation von Tonmineralen belegen in den untersuchten Pedons eine nach Podsolierungsgrad differenzierte, aber überall weit fortgeschrittene Verwitterung in der durchwurzelten Hauptfolge. Die tonmineralogischen Veränderungen sind auf die Hauptfolge beschränkt. Durch die unterschiedliche Tonmineralgarnitur zwischen Haupt- und Basisfolge wird also die im Gelände angesprochene Schichtung des Ausgangsmaterials für die holozäne Bodenentwicklung für alle untersuchten Pedons bestätigt.

Somit deutet die Inventur der primären Silikate darauf hin, daß die Freisetzung von Ca und Mg durch Silikatverwitterung hinter der Auswaschung beider Elemente zurückbleibt; diese läuft besonders intensiv in der locker gelagerten Hauptfolge ab bei hohen Sickerwassermengen und hohen Konzentrationen an organischen Säuren.

5.5.2. Sequentieller Batch-Versuch

Bei unbehandelten (Vorversuch: H_2O , $10^{-4}M HNO_3$ und Zitronensäure) und mit Ba-belegten (Hauptversuch: $10^{-4}M HNO_3$ und Zitronensäure) Bodenproben sind die während eines 80-tägigen, sequentiellen Batch-Versuches freigesetzten Mengen von Al, Fe, Ca, Mg, Na und K um so höher, je mehr Humus die untersuchten Horizonte enthalten. Dies spricht für einen großen Einfluß der im Boden vorhandenen, chelat-aktiven und bei der Extraktion mobilisierten organischen Stoffe auf die Lösung der Metalle. Deshalb bewirkt auch in solchen humusreichen Lagen die zugesetzte Zitronensäure keine effizientere Mobilisierung als die Zugabe von Salpetersäure.

Nur bei sehr niedrigen Humusgehalten zeichnet sich eine Überlegenheit der Zitronensäure für die Mobilisierung von Al und Fe ab. Hier scheinen auch die zu Versuchsende absinkenden Redoxpotentiale im System den Effekt der Zitronensäure zu verstärken.

Entsprechend der Sättigung und der Haftfestigkeit der beteiligten Metallkationen an den Austauschern und ihre Bindung an organische Stoffe fanden wir im Vorversuch, unabhängig von der Art der Reagenzien, folgende Reihe abnehmender Freisetzungsraten (auf Ionenäquivalente bezogen):



Nach weitgehender Verdrängung der austauschbar gebundenen Kationen und ihres Ersatzes durch Ba im Hauptversuch verschiebt sich die Reihe zu:



Durch die Vorbehandlung werden austauschbares Mg, K und Na annähernd vollständig durch Ba-Ionen ersetzt. Da Ca bevorzugt an organische Stoffe gebunden wird, sind die im Vergleich zu den Mg-Gehalten höheren extrahierbaren Ca-Gehalte in den humusreichen Horizonten auch teilweise durch Mobilisieren von Ca-Humaten zu erklären.

Die im Hauptversuch extrahierten Gehalte an Na, K und Mg können weitgehend als Freisetzung durch Verwitterung von Silikaten interpretiert werden. Dabei verläuft offensichtlich die Mobilisierung von K aus Glimmern, Illiten und Alkali-Feldspäten insgesamt etwas schneller als die Na-Freisetzung aus Plagioklasen. Obwohl die Gesamtgehalte an K der Feinerde auf saurem Ausgangsgestein um den Faktor fünf höher liegen

als auf glimmer- und illitarmen ultrabasischem Amphibolit, zeigt sich in den Batch-Versuchen kein Einfluß des Gesteins auf die Freisetzungsraten. Sie liegen sehr niedrig, bedingt durch die geringe H^+ -Ionenkonzentration der zugegebenen Säuren, so daß Unterschiede im Mineralkörper der Böden nicht zur Geltung kommen.

Für Na läßt sich das Fehlen von Differenzen zwischen den Bodenformen durch das geringe Vorkommen der Plagioklasse mit hohen Albit-Gehalten in der Feinerde auf saurem Substrat und dem niedrigen Albit-Gehalt der an sich reichlich vorhandenen Plagioklasse auf Amphibolit erklären.

Die Ergebnisse der sequentiellen Batch-Versuche stehen im Einklang mit den bodenchemischen und mineralogischen Untersuchungsbefunden an der Feinerde der verschiedenen Bodenformen. Die geringe Ca- und Mg-Freisetzungsraten beruhen darauf, daß auf saurem Gestein nur geringe Gehalte an Ca- und Mg-haltigen Mineralen vorliegen, die im Oberboden auch schon teilweise verwittert sind (v.a. Biotit). Zum anderen ist in den Bodenformen aus Amphibolit die Mg-reiche Hornblende vor allem in der Feinsand-Fraktion vertreten, wo sie der chemischen Verwitterung nur schwer zugänglich ist. Diese einheitliche und begrenzte Ca- und Mg-Freisetzung bei den bodeneigenen pH-Werten ist der Grund für die geringen Vorräte an austauschbarem Ca und Mg einerseits und die schwache Versorgung der Fichte mit beiden Elementen andererseits.

Auch die deutlich raschere Nachlieferung von K (Na) während der Versuchsdauer von 80 Tagen im Batch-Experiment stimmt mit der sehr guten K-Ernährung der Fichten-Hochlagenbestände überein.

Aus den Erfahrungen mit den durchgeführten Verwitterungs-Simulationsversuchen lassen sich für zukünftige Laborexperimente unter möglichst naturnahen Bedingungen folgende Verbesserungsvorschläge machen:

- Durch eine Zerstörung der organischen Stoffe mittels schonender Oxidation könnte der starke Einfluß löslicher Huminstoffe auf das Reaktionsgeschehen vermindert werden.
- Um eine Veränderung des Redoxpotentials im Versuchssystem während der Versuchslaufzeit zu vermeiden, sollten die Experimente in offenen Gefäßen mittels Perkolation durchgeführt werden.
- Die Entfernung der an den Austauscheroberflächen befindlichen Ionen ist auf jeden Fall erforderlich, um die Freisetzung insbesondere von Ca und Mg, und K und Na aus primären Silikaten abschätzen zu können. Bisher wurde hierfür sehr stark eintauschendes Ba verwendet (vgl. SÜSSER 1987). Das überschüssige $BaCl_2$ ist durch Perkolation in offenen Gefäßen ebenfalls leichter zu entfernen als durch Schütteln und Zentrifugation. Um Hydrolyse und Fällung von austauschbarem Al zu verhindern, sollte der pH-Wert der $BaCl_2$ -Lösung auf pH=3 eingestellt werden (vgl. SÜSSER 1987).
- Die Anfangs-pH-Werte in den Versuchen bestätigen, daß die Konzentration der verwendeten Säuren den natürlichen Bedingungen durchaus entspricht; denn es kam zu keiner pH-Abenkung gegenüber den in H_2O

gemessenen Boden-pH-Werten im Vorversuch. Nur wenn die Verwitterungssimulation v.a. die von den verschiedenartigen Mineralkörpern ausgehenden Einflüsse erfassen soll, kann mit höheren H^+ -Ionenkonzentrationen gearbeitet werden. Ein solches Vorgehen entspricht dann allerdings nicht den durchschnittlichen Verhältnissen, sondern prüft die Auswirkungen einer extremen Belastung durch besonders saure Niederschlagsereignisse (z.B. pH=3).

6. Beziehung zwischen dem Boden und der Intensität der Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes

Neben der Geländemorphologie und dem Ausgangsgestein war der Gesundheitszustand der Fichten-Bestände ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der Untersuchungsgebiete in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes. Es wurden gezielt Standorte mit gesunden Hochlagenfichten neben solchen mit verschiedenartig vergilbten Bäumen (Mg-Mangelchlorose) gesucht, um eventuelle Zusammenhänge zwischen Bodenformen, bodenchemischem Milieu und Vergilbungsgrad erfassen zu können.

Der pH-Wert der Böden ist in allen 4 untersuchten Gebieten recht einheitlich; er liegt in den A-Horizonten der Pedons aus Graniten und Gneisen i.d.R. > 4.2 (H_2O) bzw. > 3.5 ($CaCl_2$) und steigt an der Basis der Hauptfolge auf 4.9 (H_2O) bzw. 4.4 ($CaCl_2$). Nur am Hohen Bogen auf ultrabasischem Ausgangsgestein sinken die pH-Werte trotz hoher Ca- und Mg-Gesamtgehalte in der Feinerde in den obersten Mineralbodenhorizonten auf 3.6 (H_2O) bzw. 3.0-3.2 ($CaCl_2$). Dies ist mit der im Vergleich zu Pedons aus saurem Ausgangsgestein höheren Al-Sättigung an den Austauscheroberflächen zu erklären, wobei das austauschbare Al möglicherweise mehr an Ton als an Humus gebunden ist.

Auch die effektive Kationen-Austauschkapazität der Böden differiert kaum zwischen den Untersuchungsgebieten. Trotz deutlich höherer Tonanteile bei ähnlich hohen Humusgehalten in der Feinerde der Hauptfolge aus Amphibolit verglichen mit Granit- und Paragneisstandorten liegt auch hier die effektive Kationen-Austauschkapazität der A- und B-Horizonte bei ≤ 10 mmol IÄ/100 g TB. Dieser geringe Wert beruht einerseits auf dem besonders tiefen pH-Wert, andererseits auf der Dominanz des Kaolinit in der Tonfraktion, der im Vergleich zu den auf saurem Ausgangsgestein vertretenen Dreischichttonmineralen eine erheblich geringere Kationen-Austauschkapazität besitzt. Da der Kaolinit auch in der von den pedogenetischen Prozessen noch weitgehend unbeeinflussten Basisfolge dominiert, muß es bereits vor oder während der Bildung der periglazialen Deckschichten zu einer intensiven Verwitterung, einer Abfuhr von Si, Alkali- und Erdalkalitionen und Kaolinitbildung gekommen sein.

In der humusreichen und durchwurzelten Hauptfolge variiert die Al-Sättigung unabhängig vom Ausgangsgestein zwischen 75-80%. Die hohe Al-Sättigung der Austauscheroberflächen sowohl am Hohen Bogen als auch auf Granit und Paragneis steigt in der von der holozänen Bodenbildung wenig überprägten Basisfolge bis auf 90% an. Dies deutet darauf hin, daß es in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes bereits präholozän zu intensiver Verwitterung und Verarmung des periglazial verlagerten Substrates gekommen ist.

ZÖTTL und MIES (1983) beobachteten im Südschwarzwald einen Zusammenhang zwischen dem Vergilbungsgrad der Fichten und der Mg-Sättigung der Austauscher. Eine solche Beziehung liegt in den eigenen Untersuchungsgebieten nicht vor. Unabhängig von Muttergestein und Bodenform er-

reicht die Mg-Sättigung im durchwurzelter Mineralboden nur 1-2% und somit eine ähnliche Größenordnung, wie sie für Böden aus Granit und Phyllit im Fichtelgebirge nachgewiesen wurden (SÜSSER 1987). Jedoch erreicht im nordostbayerischen Grenzgebirge bei etwa gleichem Protoneninput (ca. $2 \text{ kmol H}^+ \text{ xha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) die Mg-Sättigung der Böden aus Basalt 10-30%, während austauschbares Al nur im obersten Ah-Horizont erscheint. Die Böden aus Amphibolit am Hohen Bogen sind hingegen auch in den humosen Oberhorizonten bei einer Mg-Sättigung von nur 2-3% an den Austauschern zu 50-80% mit Al belegt. Die Al-Sättigung bleibt auch in der von holozänen pedogenetischen Vorgängen und von atmogenen Einflüssen weitgehend unberührten Basisfolge ähnlich hoch und die pH(H_2O)-Werte liegen unter 5 (auf Basalt im Fichtelgebirge schon im Ah 4.8-5.7); deshalb sind meines Erachtens die ungünstigen bodenchemischen Verhältnisse am Hohen Bogen eindeutig primär präholozän bedingt.

In der Mg-Sättigung der organischen Auflage unterscheiden sich jedoch die Böden aus saurem Ausgangsgestein von jenen auf ultrabasischem Amphibolit. Die Mg-Sättigung beträgt in der Auflage am Hohen Bogen 7%, (in der Hauptfolge 2%), auf Granit (Kohlschachten) und Paragneis (Rachel und Enzianfilz) werden nur 2 und 4% (Hauptfolge 1%) erreicht. Darin äußern sich die etwas höheren Gehalte an austauschbarem Mg im Mineralboden aus Amphibolit ($20-38 \mu\text{g xg}^{-1}$) im Vergleich zu Böden aus saurem Granit und Paragneis; diese enthalten mit wenigen Ausnahmen (Pedons II/C, III/D und E, VII/C in stark humosen Horizonten) in den obersten 10 cm des Mineralbodens weniger als $20 \mu\text{g xg}^{-1}$ austauschbares Mg.

ZÖTTL und MIES (1983) stellten mittels korrelationsstatistischer Analysen eine signifikante Beziehung zwischen dem austauschbaren Mg in 0-10cm Bodentiefe und den Mg-Spiegelwerten der Fichtennadeln fest. Dabei gingen Gehalte an Austausch-Mg $4-55 \mu\text{g/g}$ mit Nadelvergilbung und Mg-Gehalten in den 1/2-jährigen Nadeln $< 0.6 \text{ mg/g TS}$ einher. Nach diesen Ergebnissen für den Südschwarzwald müßten alle untersuchten Standorte in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes stark vergilbte Bestände mit Mg-Mangelchlorosen tragen. Der Vergilbungsgrad der Hochlagenfichten variiert aber unabhängig vom Ausgangsgestein sehr stark. Nadelanalytische Untersuchungen belegten jedoch auch für Bestände mit geringem Vergilbungsgrad von max. 10% (Kohlschachten und Hohen Bogen) bereits eine deutliche Verlagerung des Mg aus den älteren in die jüngeren Nadeljahrgänge bei Spiegelwerten in den Nadeln $< 1 \text{ mg/g TS}$ (ZIESAK 1988). Aus diesen Werten muß auf eine generelle, zumindest latente Mangelsituation geschlossen werden. Zwischen dem Vergilbungsgrad, den Mg-Nadelspiegelwerten und den Gehalten an austauschbarem Mg in 0-10cm des Mineralbodens bestehen jedoch keine Zusammenhänge.

Auch ALDINGER (1987) fand auf Buntsandstein-Standorten im Schwarzwald zwischen gesunden und vergilbten Fichten keine Unterschiede in der Ausstattung der zugehörigen Böden mit Austausch-Mg.

In den Gneisgebieten am Rachel und am Enzianfilz lag der Vergilbungsgrad in den vermutlich autochthonen Altbeständen zwischen 5-25%, wäh-

rend er in den 60-85-jährigen, durch Aufforstung entstandenen Beständen bis auf 40% ansteigt. Der stark schneebruchgeschädigte und stark vergilbte, absterbende Bestand am Enzianfilz ist mit Sicherheit aus nicht autochthonem Saat- oder Pflanzgut entstanden. Das gleiche ist auch für die gepflanzten Bestände am Rachel anzunehmen. Vergilbungsgrad, Nadelverluste und Absterbeerscheinungen werden also offensichtlich durch die genetische Konstitution maßgeblich bestimmt.

Die hohe Al-Sättigung der Böden bewirkt eine geringe relative Eintauschstärke der Mg-(Ca)-Ionen aus der Bodenlösung an die Austauscher, d.h. niedrige Gapon-Koeffizienten der Ionenpaare Mg^{2+}/Al^{3+} und Ca^{2+}/Al^{3+} (HILDEBRAND 1986). Die Speicherkapazität des Bodens für Mg-Ionen ist also gering. In der hier vorliegenden Studie wurde zwar die Bodenlösung nicht analysiert; in Anbetracht des engen Zusammenhanges zwischen der Austauscherbelegung und der Zusammensetzung der Bodenlösung kann jedoch davon ausgegangen werden, daß diese in allen hier untersuchten Pedons hohe Al- und nur geringe Ca- und Mg-Konzentrationen und damit enge Mg(Ca)/Al-Molrelationen aufweist (vgl. FÖRSTER 1988). Diese Annahme wird durch Untersuchungen von SÜSSER (1987) bestätigt, die zeigen, daß bei hoher Al-Sättigung an den Austauschern das durch Protonenpufferungsvorgänge freigesetzte Al in der Bodenlösung verbleibt und im Solum verlagert wird.

In den Hochlagenböden des Inneren Bayerischen Waldes liegt in der durchwurzelten Hauptfolge das molare Ca^{2+}/Al^{3+} -Verhältnis an den Austauschern zwischen 0.03 und 0.12. Nach ROST-SIEBERT (1984; zit. in MEIWES et al. 1984) wäre bei derartig niedrigen Werten in der Bodenlösung mit einer starken Gefährdung der Fichten durch Al-Toxizität und mit starker Schädigung des Feinwurzelsystems zu rechnen. Die ausnahmslos gute Versorgung der Hochlagenfichten mit N und P (BOSCH 1986; ZIESAK 1988) spricht allerdings gegen eine allgemeine, starke Reduktion der Masse an aktiven, aufnahmefähigen Feinwurzeln. Eine spezifische Hemmung der Mg- und Ca-Aufnahme dieser Wurzeln aus dem ganz geringen Angebot durch hohe Al-Konzentrationen in der Bodenlösung ist wahrscheinlicher und durch mehrere experimentelle Befunde bestätigt.

In den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes tragen wahrscheinlich nicht nur die unzureichende Ausstattung der Böden mit austauschbarem Mg (Ca) und die ungenügende Anpassung fremder Herkunft an die spezifischen Standortbedingungen, sondern auch die langanhaltende Benetzung der Kronen durch sauren Nebel- und Wolkenniederschlag zur Unterversorgung der Bestände mit Mg bei. Die Hochlagen stecken etwa 1/3 des Jahres in Wolken. Durch die relativ große Oberfläche der winzigen Nebeltropfen und ihre lange Verweildauer in der Atmosphäre können sie besonders viele Aerosole und Gase (SO_2 und NO_x) aufnehmen, die sich (nach Oxidation) zu H_2SO_4 und HNO_3 lösen und einen stark sauren Wolkenniederschlag verursachen.

Hierdurch wird die Auswaschung der leicht beweglichen Elemente K, Ca, Mg, Mn und Zn aus den Nadeln verstärkt. Die Bäume versuchen wahrscheinlich, diese Verluste durch erhöhte Aufnahme aus dem Boden zu kompensieren. Dies gelingt jedoch nur bei Elementen wie K und Mn mit hoher

Anlieferung aus Verwitterung im durchwurzelten Bodenraum. Die geringen Vorräte an verfügbarem Ca und Mg, die nur langsame Nachlieferung durch Verwitterung und die spezifische Aufnahmehemmung durch antagonistische Wirkungen des Al verhindern jedoch diesen Ersatz.

Schwermetalluntersuchungen am Standort Enzianfilz (Paragneis) zeigen, daß die durch Immissionen zugeführten Pb- und Cd-Mengen noch weitgehend im Auflagehumus gebunden an organische Stoffe vorliegen. Toxische Konzentrationen dieser Elemente wie auch von Cu, Zn usw. sind nicht wahrscheinlich. Die Gefahr einer verstärkten Mobilisierung von Schwermetallen durch Kalkung (vgl. SCHIERL et al. 1986) sowie Auswaschung von $\text{NO}_3\text{-N}$ nach rascher Mineralisierung und Nitrifikation muß bei Entscheidungen über Düngungsmaßnahmen zur Beseitigung des Mg-Mangels berücksichtigt werden.

Insgesamt sind die Armut der Böden an verfügbarem Mg und eine ungenügende Nachlieferung von Mg durch Verwitterung als disponierende Faktoren für die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes zu werten. Die Inventur der primären Silikate deutet darauf hin, daß die Freisetzung von Ca und Mg hinter der Auswaschung beider Elemente zurückbleibt, die in der locker gelagerten Hauptfolge bei hohen Sickerwassermengen besonders intensiv abläuft. Zudem sind die Gehalte an Ca- und Mg-haltigen Silikaten auf saurem Ausgangsgestein eher gering und, je nach Podsolierungsstärke in den Oberbodenhorizonten, teilweise schon durch Verwitterung abgebaut (z.B. Biotit).

Auf Amphibolit hingegen liegt die Fe- und Mg-reiche Hornblende vor allem in der chemischen Verwitterung nur wenig zugänglichen Feinsand-Fraktion vor, so daß trotz hoher Hornblende-Gehalte deren Beitrag zur Silikatpufferung gering bleibt.

Diese Interpretation der mineralogischen Befunde wird durch die Ergebnisse des sequentiellen Batch-Versuches bestätigt, der unter möglichst naturnahen Bedingungen durchgeführt wurde. Bei der geringen H^+ -Ionenkonzentration der verwendeten Reagenzien (10^{-4}M HNO_3 und Zitronensäure) kam es nur zu einer begrenzten und nicht nach Muttergestein differenzierter Ca- und Mg-Freisetzung in allen untersuchten Pedons aus Granit, Glimmerschiefer/Paragneis, Paragneis und Amphibolit. Die deutlich raschere Nachlieferung von K (Na) während der Versuchsdauer von 80 Tagen stimmt mit der sehr guten K-Ernährung der Fichten-Hochlagenbestände überein.

Ob diese ungenügende Ausstattung mit Mg und (Ca) in den letzten Jahrzehnten durch pH-Absenkung, Al-Mobilisierung und Basenauswaschung sich noch verschärfte, kann aus dieser Studie nicht gefolgert werden, da keine völlig vergleichbaren Profile zur Abschätzung des Zeitrends zur Verfügung standen. In Anbetracht der Protoneneinträge, die zwischen 1 und $2 \text{ kmol H}^+ \text{ x ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen, sowie einer S- und N-Deposition von max. 50 kg $\text{SO}_4\text{-S}$ und 25 kg $\text{N x ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ist eine zusätzliche Entbasung wahrscheinlich.

Dafür spricht auch die Tatsache, daß in der durchwurzelten Hauptfolge

Vermikulite mit Al-Hydroxy-Zwischenschichtbelegung vorkommen, wie sie unter Einwirkung mineralischer Säuren entstehen. Der Nachweis einer engen Korrelation zwischen pH-Wert und Sulfat-Konzentration in den durch die Hauptfolge perkolierten Quell- und Bachwässern (FÖRSTER 1988) verdeutlichen den möglichen Einfluß der durch Niederschläge eingebrachten anthropogenen Mineralsäuren auf das Verwitterungsgeschehen und damit auf die Nährelement-Nachlieferung.

7. Zusammenfassung

Seit ca. 1980 wird in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes eine Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst) beobachtet, deren kennzeichnendes Symptom eine Vergilbung der Nadeln an älteren Trieben ist. Diese Vergilbung entspricht einer Mg-Mangelchlorose und ist von einer schwachen Ca- und Zn-Versorgung der betroffenen Bestände begleitet. Das Krankheitsbild tritt bei allen Altersgruppen der Hochlagen-Fichten auf und ist beschränkt auf saure Böden mit geringer Basen- und hoher Al-Sättigung.

Über das Zusammenspiel der Faktoren, die zu dem extremen Mg-Mangel führen herrscht Unklarheit. Das Ausmaß der chemischen Veränderungen der Hochlagen-Böden unter dem Einfluß saurer Deposition und ihre Bedeutung für das Zustandekommen dieser spezifischen Walderkrankung ist unstritten.

Im Rahmen dieser Studie wurden typische Böden der Hochlagen vielseitig charakterisiert, um damit Grundlagen für das Verständnis der Fichtenerkrankung auf diesen Standorten und für die Rolle der Böden im Komplex der Schadfaktoren zu erarbeiten:

-Eine großmaßstäbliche (1:10 000) Kartierung repräsentativer Gipfel-Kleinlandschaften (oberhalb 1100 m ü.NN) mit verschiedenem Ausgangsgestein (Granit, Paragneis, Amphibolit) leitete die bodenkundliche Inventur der Hochlagenböden im Inneren Bayerischen Wald ein. Das Verteilungsmuster der Bodenformen erwies sich dabei zum einen durch Gesteinstyp, Höhenlage, Klimaverhältnisse und Relief vorbestimmt; zum anderen wird es durch die Mächtigkeit der locker gelagerten Hauptfolge über der verfestigten Basisfolge und die dadurch vorgegebene Menge, Fließrichtung und Geschwindigkeit des Sickerwasser-Abflusses geprägt. Der verschiedenartige Silikatbestand der vorkommenden Gesteine wirkt sich dagegen nur schwach aus.

-So bildeten sich in den Plateau- und Sattellagen infolge einer langanhaltenden Naßkalt-Phase im Frühsommer mächtige Rohhumusdecken, deren niedermolekularen Huminstoffe sehr mobile metallorganische Komplexe aufbauen können. Diese Chelate, zusammen mit Sesquioxidsolen und ionarem Fe, Al und Mn werden in dem auf die Gipfel-Verebnungen beschränkten, primär gröberen Bodenmaterial (lehmiger Sand) v.a. vertikal verlagert. Deshalb entwickelten sich in den Plateau- und Sattellagen hauptsächlich typische flachgründige Hochlagen-Podsole.

In den oberen Hanglagen werden diese Podsole von Braunerde-Podsolen abgelöst, deren Verarmungshorizont durch hohe Humusgehalte maskiert ist, weshalb sie morphologisch nur schwer zu erkennen sind. Wahrscheinlich wird durch das im Gegensatz zu den Plateau- und Sattellagen raschere Ausapern des Schnees im Frühjahr und durch einen entsprechend günstigeren Bodenwasser- und Lufthaushalt die Umsetzung der organischen Stoffe und die Tätigkeit von Bodenwühlern in diesen Böden gefördert.

Unterhalb dieser maskierten Braunerde-Podssole folgen typische Braunerde-Podssole und schließlich die mittel- bis tiefgründigen Podsol-Braunerden, deren Wasser- und Wärmehaushalt bereits deutlich günstiger ist, so daß der Buchenanteil hier rasch zunimmt. Die Obergrenze dieser Podsol-Braunerden steigt mit zunehmender Süd-Exposition um rund 50 Höhenmeter an.

-Die chaotisch gelagerte Hauptfolge entspricht dem periglazialen Auftaubereich. Sie kann stellenweise einen erhöhten Schluffanteil aus Flugstaub-Einwehungen enthalten; ihr gegenüber der unterlagernden Basisfolge erhöhter Tonanteil ist auf krypturbate Vorgänge und holozäne Verwitterung zurückzuführen. In der dichten Basisfolge kam es durch laminares Fließen und/oder Translationsvorgänge entlang von Eislinen zu einer hangparallelen Skeletteinregelung und zur Ausbildung eines plattigen Gefüges. Frosthub der Steine über wachsenden Eislinen führte zum Aufpressen von Schluffhäutchen auf die Oberseite der Steine.

-In einem 2. Arbeitsschritt wurden 18 typische Leitpedons aus diesen repräsentativen Boden-Kleinlandschaften umfassend morphologisch und chemisch charakterisiert, um ihre Genese, ihre Eigenschaften und ihre Dynamik beurteilen zu können.

-Die überlegenen Tongehalte der Hauptfolge im Vergleich zur Basisfolge sind einerseits auf verstärkte Kryoklastik im Periglazial, zum anderen auf Verwitterung der primären Silikate während der holozänen Pedogenese zurückzuführen. Aus der Änderung des Tonmineralbestandes und dem deutlichen Rückgang des Tongehaltes an der Schichtgrenze zwischen Haupt- und Basisfolge sind intensive, holozäne Verwitterungsvorgänge abzulesen. Vor allem die Zwischenschichtbelegung der besonders in der Hauptfolge der Pedons aus saurem Ausgangsgestein dominierenden Vermikulite mit Al-Hydroxo-Kationen machen säurebedingte (anthropogene) Strukturveränderungen insbesondere der für die KAK wichtigen Dreischichtminerale wahrscheinlich.

-Die deutlichen Unterschiede in der Verlagerung des pedogenen Fe in den untersuchten Pedons führte - in Anlehnung an BLUME und SCHWERTMANN (1964) - zum Vorschlag neuer Abgrenzungskriterien zwischen den vorgefundenen Bodenformen anhand der Fe -Gehalte im Ae- und Bs-Horizont: bei fehlender bzw. sehr schwacher Fe -Verlagerung (Gehaltsdifferenz Ae/Bs 5%) wurden (podsolige) Braunerden ausgeschieden. In der Podsol-Braunerde erreicht der Anstieg der Gehalte an pedogenem Fe vom Eluvial- zum Illuvialbereich zwischen 5-30%. Die Grenze zwischen Braunerden und Podsolon liegt somit bei 30% Fe-Gehaltsdifferenz. Innerhalb der Gruppe der Podsole sind die Braunerde-Podsole durch eine Zunahme des Gehaltes an pedogenem Fe vom A- zum B-Horizont zwischen 30 und 100%, die typischen Hochlagen-Podsole durch einen solchen von über 100% gekennzeichnet. Ein weiteres Kriterium für die Abgrenzung der typischen Podsole vom Subtyp Braunerde-Podsol ist die Ausbildung eines Bh-Horizontes infolge Einspülung von Huminstoffen (Eisenhumuspodsole).

-Entsprechend dem unterschiedlichen Ausgangsgestein differieren die

Gesamtgehalte einiger Bielemente deutlich zwischen den einzelnen Bodenformen. Die Ca_1 -, Mg_1 -, Mn_1 - und Fe_1 -Gehalte sind in den Böden aus Mg- und Fe-reichen Hornblende- und Ca-Plagioklasreichem Amphibolit gegenüber den Böden aus kieselensäurereichem Granit und Paragneis deutlich erhöht, die K- und Na-Gesamtgehalte hingegen niedriger.

- Im Gegensatz zu den lithogenen Unterschieden in den Gesamtgehalten differieren die Kationen-Austauscheigenschaften der Hochlagenböden im Inneren Bayerischen Wald nur wenig. Trotz deutlich höherer Tonanteile der Feinerde auf Amphibolit verglichen mit den Granit- und Paragneis-Pedons und ähnlichen Humusgehalten erreicht die KAK eff. auch hier nur Werte $\leq 10 \text{ mmol IÄ/100g TB}$. Dieser geringe Wert beruht einerseits auf dem tiefen pH-Wert (in den obersten Mineralbodenhorizonten 3.6 (H_2O) bzw. 3.0-3.2 (CaCl_2)), andererseits auf der Dominanz des Kaolinit in der Tonfraktion. Da der Kaolinit auch in der von pedogenetischen Prozessen weitgehend unbeeinflussten Basisfolge vorherrscht, muß es bereits vor oder während der Bildung der periglazialen Deckschichten zu einer intensiven Verwitterung und Abfuhr von Si, Alkali- und Erdalkalitionen gekommen sein. Demnach wich vermutlich der bodenchemische Zustand der Pedons am Hohen Bogen zu Beginn der holozänen Bodenentwicklung nicht erheblich von jenem der Böden aus saurem Muttergestein ab.
- Die aus periglazialen Schuttdecken verschiedener Magmatite und Metamorphite entwickelten Böden in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes sind vermutlich schon seit langem stark sauer, Mg-arm und Al-gesättigt, worauf u.a. die hohe Al-Sättigung (bis > 90%) der Austauscher auch im Unterboden hinweist. In der humusführenden und durchwurzelten Hauptfolge variiert die Al-Sättigung unabhängig vom Ausgangsgestein zwischen 75-80%. Die Mg-Sättigung der Austauscher in den A-Horizonten schwankt zwischen 1-2 (Granit und Paragneis) und 3% (Amphibolit). Die etwas bessere Mg- und Ca-Ausstattung der Böden aus ultrabasischem Gestein spiegelt sich in der Basensättigung (austauschbares Ca, Mg und K) der O-Horizonte (nicht aber in jener der Mineralbodenlagen) wider, die hier 50% überschreitet, während sie in Granit-Pedons nur 25-45% und auf Paragneis nur rund 20% beträgt.
- Schwermetallanalysen am Standort Enzianfilz (Paragneis) zeigten, daß die durch Immission zugeführten Pb- und Cd-Mengen noch weitgehend im Auflagehumus an organische Stoffe gebunden vorliegen. Toxische Gehalte dieser Elemente wie auch von Cu, Zn, Co, Ni und Cr sind nicht wahrscheinlich.
- Anhand einer Bestandsaufnahme der vorhandenen Silikate einschließlich der Tonminerale wurde versucht, das Potential der "nachschaaffenden Kraft" durch Silikatverwitterung in den untersuchten, basenarmen Böden abzuschätzen. In den Böden aus Gneis und Granit kommen in der Schwer- und Leichtmineralfraktion vor allem Ca- und Mg-arme Silikate vor. Die Oberböden enthalten je nach Podsolierungsgrad nur wenige Bielemente, die für die Mg-Ausstattung der Böden aus saurem Ausgangsgestein wichtig sind.

- Der Schwermineral-Gehalt der Böden aus Amphibolit übertrifft mit 60-65% jenen der Böden aus saurem Ausgangsgestein (4-7%) und entfällt zu über 80% auf eine Mg- und Fe-reiche Hornblende. Diese ist jedoch in der Feinsand-Fraktion angereichert und somit der chemischen Verwitterung nur wenig zugänglich. Ihr Beitrag zur Silikatpufferung und Mg-Freisetzung dürfte deshalb nur gering sein.
- Ausgehend von den Kenntnissen über den Mineralbestand der Hochlagenböden aus verschiedenem Ausgangsgestein wurden für ausgewählte Horizonte des durchwurzelten Bereichs im Labor sequentielle Batch-Versuche unter kontrollierten, möglichst naturnahen Bedingungen durchgeführt. Bei der geringen H^+ -Ionenkonzentration der verwendeten Reagenzien (10^{-4} M HNO_3 und Zitronensäure) kam es nur zu einer begrenzten und in allen überprüften Pedons einheitlichen Ca- und Mg-Freisetzung, worin die schwache Ausstattung der Hochlagen-Böden mit austauschbarem Mg und Ca begründet ist. Dieser Befund erklärt teilweise die unzureichende Mg-Ernährung vieler Hochlagenfichten. Die deutlich raschere Nachlieferung von K während der Versuchsdauer von 80 Tagen stimmt ebenfalls mit der sehr guten K-Ernährung der Hochlagenbestände überein. Diese experimentellen Ergebnisse bestätigen somit die Befunde der bodenchemischen Inventur und der Silikat-Bestandsaufnahme: eine ungenügende Nachlieferung von Mg und Ca durch Verwitterung führt angesichts der intensiven Auswaschung zu ungenügenden Gehalten und Sättigungen des austauschbaren Mg und Ca im Oberboden. Diese spezifische Konstellation mineralogischer und chemischer Bodeneigenschaften ist als disponierender Faktor für die Erkrankung der Fichte in den Hochlagen des Inneren Bayerischen Waldes zu werten.
- Um eventuelle Zusammenhänge zwischen bodenchemischen Kriterien und dem Gesundheitszustand der Bestände zu erfassen, wurden Kartiergebiete mit unterschiedlich stark geschädigten Fichtenbeständen ausgewählt. Zwischen den Daten der Bodenanalysen und der Schadensklassifizierung bzw. dem Vergilbungsgrad der Bestände war keine Beziehung nachweisbar. In den Gneisgebieten am Rachel und am Enzianfilz liegt der Vergilbungsgrad der vermutlich autochthonen Altbestände zwischen 5-25%, während er in den 60-85jährigen, durch Aufforstungen entstandenen Beständen bis auf 40% ansteigt. Letztere sind stark schneebuchgeschädigt und am Enzianfilz nachweisbar aus nicht autochthonem Saat- oder Pflanzgut entstanden. Vergilbungsgrad, Nadelverluste und Absterbeerscheinungen werden also offensichtlich durch die genetische Konstitution maßgeblich bestimmt.
- Ergänzend zur bodenkundlichen Inventur und zur Schadensansprache der Bestände wurde in den 4 Kartierungsgebieten auf einer Fläche von ca. 100qm um jedes der 18 Leitpedons eine vegetationskundliche Aufnahme durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß die Aufnahmeflächen eines Untersuchungsgebietes nur geringfügig variierten. Unterschiede zwischen den typischen Hochlagenstandorten Kohlschachten (Granit), Rachel und Enzianfilz (Paragneis) einerseits und dem auf ca. 1000m ü.NN gelegenen Untersuchungsgebiet Hoher Bogen (Amphibolit) andererseits sind vor allem durch die geringere Meereshöhe des Amphibolit-Standortes zu erklären. Eine Abhängigkeit der Zusammensetzung der Bodenvegetation vom Bodentyp ist nicht zu erkennen.

8. LITERATURVERZEICHNIS

- AG BODENKUNDE, 1982: Bodenkundliche Kartieranleitung.
3. Aufl., Hannover.
- ALDINGER, E., 1987: Elementgehalte im Boden und in Nadeln verschieden stark geschädigter Fichten-Tannen-Bestände und Praxis-kalkungsflächen im Buntsandstein-Schwarzwald.
Freiburger Bodenkdl. Abh., Heft 19.
- ANDERSON, H. A., BERROW, M. L., FARMER, V. C., HEPBURN, A., RUSSELL, J. D. and WALKER, A. D., 1982: A reassessment of podzol formation processes.
J. Soil. Sci., 33, 125-136.
- ARNAUD, R. J. St. and WHITESIDE, E. P., 1963: Physical breakdown in relation to soil development.
J. Soil Sci., 14, 267-281.
- BALL, D. F. and BEAUMONT, P., 1972: Vertical distribution of extractable iron and aluminium in soil profiles from a brown earth-peaty podzol association.
J. Soil Sci., 23, 298-308.
- BARSHAD, J., 1964: Chemistry of soil development.
In: F. E. BEAR (Ed.), Chemistry of the soil. Reinhold, New York, 1-70.
- BASCOMB, C. L., 1968: Distribution of pyrophosphate-extractable iron and organic carbon in soils of various groups.
J. Soil Sci., 19, 251-268.
- BAUBERGER, W., 1977: Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 7046 Spiegelau und zum Blatt Nr. 7047 Finsterau.
Bayer. Geol. L.-amt, München.
- BAUMGARTNER, A., 1958a: Die Regenmengen als Standortsfaktor am Gr. Falkenstein.
Forstw. Cbl., 77, 230-237.
- BAUMGARTNER, A., 1958b: Nebel und Nebelniederschlag als Standortsfaktor am Gr. Falkenstein.
Forstw. Cbl., 77, 257-272.

- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1964: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000.
Bayer. Geol. L.-amt, München.
- BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT, 1981: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000.
Bayer. Geol. L.-amt, München.
- BAYERISCHE FORSTLICHE VERSUCHS-und FORSCHUNGSANSTALT, 1987: Waldschadensinventur Bayern 1987-Arbeitsanweisung.
München.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, 1982: Dokumentation über die lufthygienische Lage im nordostbayerischen Grenzgebiet.
Bayer. L.-amt. f. Umweltschutz, München.
- BERNER, R.A. and HOLDREN Jr., G.R., 1977: Mechanism of feldspar weathering: some observational evidence.
Geology, 5, 369-372.
- BERNER, R.A., SJÖBERG, E.L., VELBEL, M.A. and KROM, M.D., 1980: Dissolution of pyroxenes and amphiboles during weathering.
Science, 207, 1205-1206.
- BLUM, W.E.H. und RAMPAZZO, N., 1987: Chemisch-mineralogische Bodenstandsänderungen durch Bodenversauerung.
In: Forschungsinitiative gegen das Waldsterben. BMFT-Bericht, 69-81.
- BLUME, H.-P. und SCHWERTMANN, U., 1969: Genetic evolution of profile distribution of Al, Fe and Mn oxides.
Soil Sc. Soc. Amer. Proc., 33, 438-444.
- BOENIGK, W., 1983: Schwermineralanalyse.
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- BOSCH, C., FFANNKUCH, E., BAUM, U. und REHFUESS, K.E., 1983: Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes.
Forstwiss. Cbl., 102, 167-181.
- BOSCH, C., 1986: Standorts- und ernährungskundliche Untersuchungen zu den Erkrankungen der Fichte (*Picea abies* Karst.) in höheren Gebirgslagen.
Forst. Forschungsberichte, 75, München.

- BOSSE, I., 1964: Verwitterungsbilanzen von charakteristischen Bodentypen aus Flugsanden der nordwestdeutschen Geest (Mittellweser-Gebiet).
Diss.Univ.Göttingen.
- BRONGER, A., KALK, E. und SCHRÖDER, D., 1976: Über Glimmer- und Feldspatverwitterung sowie Entstehung und Umwandlung von Tonmineralen in rezenten und fossilen Lössböden.
Geoderma, 16, 21-54.
- BUSENBERG, E. und CLEMENCY, C. V., 1976: The dissolution kinetics of feldspars at 25°C and 1 atm. CO₂ partial pressure.
Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 41-49.
- CHOU, L. and WOLLAST, R., 1984: Study of the weathering of albite at room temperature and pressure with a fluidized bed reactor.
Geochim. Cosmochim. Acta, 48, 2205-2218.
- CHOU, L. and WOLLAST, R., 1985: Steady-state kinetics and dissolution mechanisms of albite.
Amer. J. Sci., 285, 963-993.
- CLAYTON, J. L., 1983: A rational basis for estimating elemental supply rate from weathering.
In: STONE, E. L. (ed.): Forest soils and treatment impacts.
Proc. 6. North American Forest Soils Conference.
- CLAYTON, J. L., 1986: An estimate of plagioclase weathering rate in the Idaho Batholith based upon geochemical transport rates.
In: Rates of chemical weathering of rocks and minerals,
19, 453-466.
- CORRENS, C. W. und ENGELHARDT, W., 1938: Neue Untersuchungen über die Verwitterung des Kalifeldspats.
Chem. Erde, 12, 1-22.
- CRONAN, C. S., 1985: Chemical weathering and solution chemistry in acid forest soils: Differential influence of soil type, biotic process and H⁺-deposition.
In: J. I. DREVER (ed.): The chemistry of weathering.
D. Reidel Pub. Comp., 175-195.
- DAWSON, H. J., UGOLINI, F. C., HRUTFIORD, B. F. and ZACHARA, J., 1978: Role of soluble organics in the soil process of a podzol, Central Cascades, Washington.
Soil Sci., 126, 290-296.

- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT, 1975: Exkursionsführer der Tagung in Regensburg.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 21, 75-77.
- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT, 1975: Exkursionsführer zur Jahrestagung der DBG 1975 in Freiburg.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 28, 173-244.
- DEUTSCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT, 1985: Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 44, 1-39.
- DILL, H. und ZECH, W., 1980: Schwermineralverteilung in einigen bayerischen Deckschicht- und Bodenprofilen.
Geol. Jahrb., D41, 3-22.
- DIXON, J. B. and WEED, S. B., 1977: Minerals in soil environments.
Soil Sci. Soc. Amer., Madison, Wisconsin, U.S.A.
- ELLENBERG, H., 1979: Zeigerwerte der Gefäßpflanzen Mitteleuropas.
Scripta Geobotanica, 3, Göttingen.
- ELLING, W. und REHFUESS, K.-E., 1984: Vorschlag eines Standardverfahrens für die physikalische und chemische Kennzeichnung von Waldböden.
Allg. Forst- u. J., 30/31, 785-788.
- ELLING, W., BAUER, E., KLEMM, G. und KOCH, H., 1987: Klima und Böden. Nationalpark Bayer. Wald, 1. 2. Auflage. Hrsg.: Bayer. Staatsmin. f. Ern., Landw. u. Forsten, München.
- FARMER, V. C., RUSSELL, J. D. and BERROW, M. L., 1980: Imogolite and proto-imogolite allophane in spodic horizons: evidence for a mobile aluminium silicate complex in podzol formation.
J. Soil Sci., 31, 673-684.
- FARMER, V. C., 1982: Significance of the presence of allophane and imogolite in podzol Bs horizons for podzolisation mechanisms: a review.
Soil Sci. Plant Nutr., 29, 571-578.

- FARMER, V.C. and FRASER, A.R., 1982: Chemical and colloidal stability of sols in the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ -system: their role in podzolisation.
J. Soil Sci., 33, 737-742.
- FARMER, V.C., RUSSELL, J.D. and SMITH, B.F.L., 1983: Extraction of inorganic forms of translocated Al, Fe and Si from a podsol Bs-horizon.
J. Soil Sci., 34, 571-576.
- FARMER, V.C., 1986: Synthetic and natural allophane and imogolite: a synergistic relationship.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., V, 346-354.
- FARMER, V.C., GODMAN, B.A. and PATERSON, E., 1986: The effect of pH on the chemistry of manganese, iron and aluminium oxides.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., V, 63-68.
- FEHN, H., 1959: Oberpfälzer und Bayerischer Wald.
In: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Remagen.
- FEZER, F., 1953: Schuttdecken, Blockmassen und Talformen im nördlichen Schwarzwald.
Gött. Geogr. Abhandl., 14, 1-33. Göttingen.
- FIEDLER, J. und HOFMANN, W., 1985: Ältere und neuere Messungen zur Bodenazidität in Fichtenbeständen des Erzgebirges.
Agrarwiss. Ges. DDR. Wiss. Tagung 1. Dresden.
- FITZPATRICK, E.A., 1956: An indurated soil horizon formed by permafrost.
J. Soil Sci., 7, 248-257.
- FLEISCHMANN, C., 1986: Mikromorphologische, Korngrößenanalytische, tonmineralogische und bodenchemische Kennzeichnung podsolierter Böden des Fichtelgebirges unter besonderer Berücksichtigung ihrer Genese und Klassifikation.
Unveröff. Dipl.-Arb. Univ. Bayreuth.
- FELSTER, H., 1985: Proton consumption rates in holocene and present-day weathering of acid forest soils.
In: DREVER, J. I. (ed.): The chemistry of weathering. Nato ASI series. 143, 197-209.

- FÖRSTER, H., 1988: Standortkundlich-bodenkundliche und hydrologisch-hydrochemische Untersuchungen in ausgewählten Hochlagengebieten des Bayerischen Waldes.
Diss. Univ. München.
- FRANKE-CAMPANA, S. J., 1986: Bodenchemische Auswertung von Meliorationsversuchen in Kiefernbeständen (*Pinus silvestris* L.) auf Phyllitstandorten in der Oberpfalz.
Diss. Univ. München.
- FRIED, G., 1984: Gestein, Relief und Boden im Buntsandstein-Oderwald.
Frankfurter Geowiss. Arb., 4. Frankfurt/Main.
- GEBHARDT, H., MEYER, B. und SCHEFFER, F., 1967: Mineralogische Schnelluntersuchung der Grobton-, Schluff- und Feinsandfraktion von Böden mit dem Phasenkontrastmikroskop.
Zeiss-Mittlgn., 4, 309-322.
- GJEMS, O., 1967: Studies on clay minerals and clay formation in soil profiles of Scandinavia.
Meddelelser fra det norske Skogforsksvesen, Vollebek, 81, 303-308.
- GJEMS, O., 1970: Mineralogical composition and pedogenetic weathering of the clay fraction in podzol soil profiles in Zalesine Yugoslavia.
Soil Sci., 110, 237-242.
- GOLDICH, S. S., 1938: A study of rock weathering.
J. Geol., 46, 1-58.
- GÖTTLEIN, A., 1988: Einfluß von saurer Beregnung und Kalkung auf wasserlösliche organische Stoffe eines Waldbodens unter Fichte.
Diss. Univ. München.
- GRIMM, W. D., 1973: Stepwise heavy mineral weathering in the Residual Quarz Gravel, Bavarian Molasse (Germany).
Contr. Sediment., 1, 103-125.
- HANTSCH, R., 1987: Wasser- und Elementbilanz von geschädigten, gedüngten Fichtenökosystemen im Fichtelgebirge unter Berücksichtigung von physikalischer und chemischer Bodenheterogenität.
Bayreuther Bodenkd. Ber., 3.

- HARTIKAINEN, H., 1986: Acid-and base titration behaviour of Finnish mineral soils.
Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 149, 522-532.
- HEIL, K., 1988: Der Einfluß von Standort und Bestockung auf die Stofffracht im Sickerwasser von Waldbeständen des Nationalparks Bayerischer Wald.
Projekt B 48: Zwischenbericht vom 1.3.1987-29.2.1988.
Univ. München.
- HEINRICHS, H., WACHTENDORF, B., WEDEPOHL, K. H., RÖSSNER, R. und SCHWERDT, G., 1986: Hydrochemie der Quellen und kleineren Zuflüsse der Sösetalsperre (Harz).
N. Jb. Mineral. Abh., 156, 23-62. Stuttgart.
- HELGESON, H. C., 1971: Kinetics of mass transfer among silicates and aqueous solutions.
Geochim. Cosmochim. Acta, 48, 421-469.
- HOLDREN jr. G. R. and BERNER, R. A., 1979: Mechanism of feldspar weathering: I. Experimental studies.
Geochim. Cosmochim. Acta, 43, 1161-1171.
- HIGASHI, T., De CONINCK, F. and GELANDE, F., 1981: Characterisation of some spodic horizons of the Campine (Belgium) with dithionite-citrate, pyrophosphate and sodium hydroxide-tetra-borate.
Geoderma, 25, 131-142.
- HILDEBRAND, E. E., 1986: Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen.
Forstwiss. Cbl., 105, 60-76.
- HÜSER, R. und REHFUESS, K.-E., 1988: Stoffdeposition und Niederschläge in ost- und südbayerischen Waldbeständen.
Forstl. Forschungsber., 86. München.
- HÜTTL, R., 1985: "Neuartige" Waldschäden und Nährelementversorgung von Fichtenbeständen (Picea abies Karst.) in Südwestdeutschland.
Freiburger Bodenk. Abh., 16.
- JOHNSON, N. M., LIKENS, G. E. and BORMAN, F. H., 1968: Rate of chemical weathering of silicate minerals in New Hampshire.
Geochim. Cosmochim. Acta, 32, 531-545.

- JOHNSON, N. M., DRISCOLL, C. T., EATON, J. S., LIKENS, G. E. and McDOWELL, W. H., 1981: "Acid rain" dissolved aluminum and chemical weathering at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire.
Geochim. Cosmochim. Acta, 45, 1421-1437.
- JUBELT, R. und SCHREITER, P., 1981: Gesteinsbestimmungsbuch.
7. Aufl., VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, Leipzig.
- KAPOOR, B. S., 1972: Weathering of micaceous clays in some Norwegian podzols.
Clay Miner., 9, 383-395.
- KAUPENJOHANN, M. und HANTSCH, R., 1987: Die kurzfristige pH-Pufferung von gestörten und ungestörten Waldbodenproben.
Z. Pflanzenern. Bodenk., 150, 156-160.
- KEILEN, K., 1978: Spurenelementverteilung und Bodenentwicklung im Bärhaldegranitgebiet (Südschwarzwald).
Freiburger Bodenkdl. Abh., 8.
- KNEIB, W. D., 1984: Konzepte der Flächeninhaltsbeschreibung in Bodenkarten.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 40, 183-190.
- KODOMA, H. and BRYDON, J. E., 1967: A study of clay minerals in podzol soils in New Brunswick, Eastern Canada.
Clay Miner., 7, 295-309.
- KÖLLING, Chr. und REHFUESS, K. E., 1987: Bioclementgehalte in der Bodenvegetation und im Auflagehumus von Hochlagen-Fichtenwäldern (Soldanello-Piceetum-VOLK) des Inneren Bayerischen Waldes.
Allg. Forst-Z., 11/12, 195-199.
- KÖNIG, N., BACCINI, P. und ULRICH, B., 1986: Der Einfluss der natürlichen organischen Substanzen auf die Metallverteilung zwischen Boden und Bodenlösung in einem sauren Waldboden.
Z. Pflanzenern. Bodenk., 149, 68-82.
- KRUG, E. C. und ISAACSON, P. J., 1984: Comparison of water and dilute acid treatment on organic and inorganic chemistry of leachate from organic-rich horizons of an acid forest soil.
Soil Sci., 137, 370-378.

- LOVELAND, P. J. und DIGBY, P., 1984: The extraction of Fe and Al by 0.1M pyrophosphate solutions: a comparison of some techniques
J. Soil Sci., 35, 243-250.
- MANLEY, E. P. und EVANS, L. J., 1986: Dissolution of feldspars by low-molecular-weight aliphatic and aromatic acids.
Soil Sci., 141, 106-112.
- MAUS, H. und STAHR, K., 1977: Auftreten und Verbreitung von Lösslehmbeimengungen in periglazialen Schuttdecken des Schwarzwald-Westabfalls.
Catena, 3, 369-386.
- MATZNER, E., 1987: Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling.
Habil.-Schrift Univ. Göttingen.
- MAZZARINO, B. M. J., 1981: Holozäne Silikatverwitterung in mitteldeutschen Waldböden aus Löss.
Diss. Univ. Göttingen.,
- MAZZARINO, B. M. J., HEINRICHS, H. und FÖLSTER, H., 1983: Holocene versus accelerated actual proton consumption in German forest soils.
In: Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems, 113-123. D. Reidel Publication Company, Dordrecht, Netherlands.
- Mc KEAGUE, J. A., 1976: An evaluation of 0.1 M pyrophosphate- and pyrophosphate-dithionite in comparison with oxalate as extractants of the accumulation products in podzols and some other soils.
Can. J. Soil. Sci., 47, 95-99.
- Mc KEAGUE, J. A., BRYDON, J. E. and MILES, N. M., 1971: Differentiation of forms of extractable iron and aluminium in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 35, 33-38.
- MEHRA, O. P. und JACKSON, M. L., 1960: Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrat system buffered with sodium bicarbonate.
Clays and Clay Minerals, 7, 317-327.

- MEIWES, K. -J., KÖNIG, N., KHANNA, P. K., PRENZEL, J. und ULRICH, B., 1984: Chemische Untersuchungsverfahren für Mineralboden, Auflagehumus und Wurzeln zur Charakterisierung und Bewertung der Versauerung in Waldböden. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, 7, 1-67, Göttingen.
- MILNER, H. B., 1962: Sedimentary petrography. Allen and Unwin Ltd., London.
- MUELLER, M., 1983: Bodenbildung auf Silikatunterlage in der alpinen Stufe des Oberengadins. Diss. ETH-Zürich.
- MURAWSKI, H., 1977: Geologisches Wörterbuch. Ferd. Enke Verlag, Stuttgart.
- NICKEL, E., 1973: Stability of heavy minerals. In: Contr. Sedimentol., 1, 1-68.
- NOACK, E.-M., 1979: Klima und Witterung. Nationalpark Bayerischer Wald, 5. Hrsg.: Bayer. Staatsmin. Ern., Landw. und Forsten. München.
- PACES, T., 1986: Weathering rates of gneiss and depletion of exchangeable cations in soil under environmental acidification. J. Geol. Soc., 143, 673-677.
- PAFFRATH, D. und PETERS, W., 1987: Untersuchungen großräumiger Luftschadstoffbelastungen im Zusammenhang mit den Waldschäden in Bayern. Forschungsbericht DFVLR-FB 87-17, Oberpfaffenhofen
- PELISEK, J., 1969: Die vertikale Bodenzonalität im Gebiet des Böhmisches Massivs. Z. Pflanzenernähr. Bodenk., 124, 148-156.
- PETERMANN, R. und SEIBERT, P., 1979: Pflanzengesellschaften des Nationalparks Bayerischer Wald. Nationalpark Bayerischer Wald, 4. Hrsg. Bayer. Staatsmin. Ern., Landw. und Forsten. München.

- PONOMAREVA, V.V. und RAGIM-ZADE, A.L., 1969: Comparative study of fulvic and acid agents of silicate mineral composition. Sov. Soil Sci. 2, 157-166.
- PRENZEL, J., 1982: Ein bodenchemisches Gleichgewichtsmodell mit Kationenaustausch und Aluminiumhydroxysulfat. Gött. Bodenkdl. Ber. 72, 1-113.
- FRIEHAÜSSER, G., 1958a: Über den Aufbau und die Oberflächenform der Ablagerungen aus dem Firneis der letzten Kaltzeit (Endwürm) im Bayerischen Wald. Geol. Bl. NO-Bayern, 8, 152-157.
- PROPACH, G., 1965: Geologisch-petrographische Untersuchungen im Nord-Ost-Teil des Gradabteilungsblattes Zwiesel. In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 6945 Zwiesel. Bayer. Geol. L.-amt., München.
- REHFUESS, K.-E., 1981: Waldböden. Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. Pareys Studentexte, 28. Hamburg und Berlin. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- REHFUESS, K.-E., 1983: Walderkrankungen und Immissionen-eine Zwischenbilanz. Allg. Forst.-Z., 28, 601-610.
- REHFUESS, K.-E. und BOSCH, Chr., 1986: Experimentelle Untersuchungen zur Erkrankung der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) auf sauren Böden der Hochlagen: Arbeitshypothese und Versuchsplan. Forstwiss. Cbl., 105, 201-206.
- REHFUESS, K.-E., 1987: Perception of forest diseases in Central Europe. Forestry, 60, 1-11.
- REHFUESS, K.-E., 1988: Übersicht über die bodenkundliche Forschung im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden. KfK-PEF-Bericht, 35, 1-26.
- RICE jr., J., BUOL, S.W. und WEED, S.B., 1985: Soil-saprolite profiles derived from mafic rocks in the Northern Carolina Piedmont I. Chemical, morphological and mineralogical characteristics and transformation. Soil Sci. Soc. Amer. J., 49, 171-177.

- RICHTER, P. 1977: Geochemische Untersuchungen an ostbayerischen Graniten.
In: BAUBERGER, W.: Geologische Karte von Bayern 1:25 000
Erläuterungen zum Blatt Nr. 7046 Spiegelau und zum Blatt
Nr. 7047 Finsterau. Bayer. Geol. Landesamt, München.
- ROBERT, M., RAZZAGHE, M. K. und VENEAU, G., 1979: Role du facteur biochimique dans l'alteration des minéraux silicates.
Science Sol 2 et 3.
- ROLOFF, A., 1984b: Morphologie der Verzweigung von *Fagus sylvatica* (L.) (Rotbuche) als Grundlage zur Beurteilung von Triebanomalien und Kronenschäden.
Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, 3,
1-25, Göttingen.
- RUPPERT, H., 1987: Natürliche Grundgehalte und anthropogene Anreicherungen von Schwermetallen in Böden Bayerns.
GLA-Fachberichte, 2, München.
- SCHEFFER, F. MEYER, B. und GEBHARDT, H., 1936: Padochemische und kryoklastische Verlehnung (Tonbidung) in Böden aus kalkreichen Lockersedimenten (Beispiel Löss).
Z. Pflanzenern. Bodenkde., 114, 77-89.
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P., 1984: Lehrbuch der Bodenkunde.
11. Überarb. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHIERL, R., GÜTTLEIN, A., HOHMANN, E., TRÜBENBACH, D. und KREUTZER, K., 1986: Einfluß von saurer Beregnung und Kalkung auf Huminstoffe sowie die Aluminium- und Schwermetалldynamik in wäßrigen Bodenextrakten.
Forstw. Cbl., 105, 309-314.
- SCHILLING, W. und WIEFEL, H., 1962: Jungpleistozäne Periglazialbildungen und ihre regionale Differenzierung in einigen Teilen Thüringens und des Harzes.
Geologie 11, 428-460.
- SCHLICHTING, E. und BLUME, H. P., 1966: Bodenkundliches Praktikum.
Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- SCHÖNBORN, A. v., und WEBER, E., 1981: Untersuchungen über die Immissionsbelastung von Tannen- und Fichtennadeln im Bereich des Bayerischen Waldes.
Forstwiss. Cbl., 100, 265-270.

- SCHRAMM, D., 1986: Pedogenese und Klassifikation von Böden aus Phyllit.
Dipl. Arb. Univ. München.
- SCHOTT, J., BERNER, R. A. und SJÖBERG, E. L., 1981: Mechanism of pyroxene and amphibole weathering. I. Experimental studies of iron-free minerals.
Geochim. Cosmochim. Acta, 45, 2123-2135.
- SCHOTT, J. und PETIT, J. C., 1987: New evidence for the mechanisms of dissolution of silicate minerals.
In: Aquatic surface chemistry: chemical processes at the particle-water interface, 293-315.
- SCHWERTMANN, U., 1964: Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung.
Z. Pflanzenern. Bodenk., 105, 194-201.
- SCHWERTMANN, U., SÜSSER, P. und NÄTSCHER, L., 1987: Protonenpuffersubstanzen in Böden.
Z. Pflanzenern. Bodenkde., 150, 174-178.
- SEMME, A., 1964: Junge Schuttdecken in hessischen Mittelgebirgen.
Notizbl. Hess. Landesanst. Bodenforschung, 92, 275-285.
- SEMME, A., 1969: Verwitterungs- und Abtragungserscheinungen in rezenten Periglazialgebieten (Lappland und Spitzbergen).
Würzb. Geogr. Arb. 26.
- STAHR, K., 1975: Qualitative und quantitative Erfassung von Schichtgrenzen.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 22, 633-644.
- STAHR, K., HILDEBRAND, E. E. und ZÜTTL, H. W., 1979: Höhenabhängigkeit der Bodenentwicklung im Gneisschwarzwald.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 28, 117-172.
- STAHR, K., 1979: Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald.
Freiburger Bodenkdl. Abh. 9.
- STAHR, K. und GUDMUNDSSON, T., 1983: Tonmineralbildung- und Umwandlung im Gneissgebiet des Südschwarzwaldes.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 32, 811-816.

- STAHR, K. und NAKAI, M., 1984: Der Nachweis von Imogolit in sauren Braunerden und Podsolen des Südschwarzwaldes und seine Bedeutung für die Bodenentwicklung. Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 39, 53-58.
- SÜSSER, P., 1987: Art, Menge und Wirkungsweise von Puffersubstanzen in Mineralbodenhorizonten forstlich genutzter Böden des Fichtelgebirges. Diss. TU Weihenstephan.
- TAMM, O., 1934: Experimentelle Studien über die Verwitterung von Silikatmineralien. ARKIV för Kemi, Mineralogi och Geologi, 11A/14, 1-27. Stockholm.
- THOMANN, C., 1963: Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans sols. Méthode au pyrophosphat de sodium. Cahiers ORSTROM, Pedologie, 3, 43-73. Paris.
- THOREZ, J., 1976: Practical identification of clay minerals. Editions G. Leclotte, Discon.
- TROLL, G. und Winter, H., 1983: The chemical composition of biotites from anatexites and metabasitic inclusions, Bayerischer Wald, Eastern Bavaria. N. Jb. Mineral. Abh., 146/2, 117-132.
- TRÜBY, P. und ALDINGER, E., 1984: Eine Methode zur schnellen Bestimmung der effektiv austauschbaren Kationen. In: TRÜBY, P., 1984: Düngung von Waldstandorten-eine Möglichkeit zur Milderung der Waldschäden? Allg. Forst- Z., 39, 1302-1304.
- ULRICH, B., 1966: Kationenaustausch-Gleichgewichte in Böden. Z. Pflanzenern. Bodenkde., 113, 141-159.
- ULRICH, B., MEYER, R. und KHANNA, P. K., 1979: Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. Schriften Forstl. Fak. Univ. Göttingen und Niedersächs. Forstl. Versuchsanstalt. Sauerländer Verlag, Frankfurt am Main.

- ULRICH, B., 1981 : Ökologische Gruppierung von Böden nach ihrem chemischen Bodenzustand.
Z.Pflanzenern.Bodenkde., 144, 289-305.
- ULRICH, B., 1983: Protonen-Produktion und Konsumation.
In: Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems.
D.Reidel Publ.Comp.Dordrecht, Netherlands.
- ULRICH, B., 1985: Natürliche und anthropogene Komponenten der Bodenversauerung.
Mitteilgn.Dtsch.Bodenkundl.Gesellsch., 43/1, 159-187.
- VAN BREEMEN, N. und WIELEMAKER, W.G., 1974a: Buffer intensities and equilibrium pH of minerals and soils:I.The contribution of minerals and aqueous carbonate to pH buffering.
Soil Sci.Soc.Amer.Proc., 38, 55-60.
- VAN BREEMEN, N. and WIELEMAKER, W.G., 1974 b: Buffer intensities and equilibrium pH of minerals and soils:II.Theoretical and actual pH of minerals and soils.
Soil Sci.Soc.Amer.Proc., 38, 61-66.
- VEITH, J. und SCHWERTMANN, U., 1972: Reaktionen von Ca-Montmorillonit und Ca-Vermikulit mit Kohlensäure.
Z.Pflanzenern.Bodenkde., 131, 21-37.
- VERLOO, M. and COTTENIE, A., 1972: Stability and behaviour of complexes of Cu, Zn, Fe, Mn and Pb with humic substances of soils.
Pedologie, 22/2, 174-184.
- VOLLMER, R. 1969: Geologisch-petrographische Untersuchungen im Westteil des Gradabteilungsblattes Finsterau 7047.
In: BAUBERGER, W., 1977: Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 7046 Spiegelau und zum Blatt Nr. 7047 Finsterau. Bayer. Geol. L.-amt, München.
- WEDEFOHL, K.H., 1974: Handbook of Geochemistry.
Springer Verlag, Berlin.
- WIECHMANN, H., 1978: Stoffverlagerung in Podsolon.
Hohenheimer Arb., 34.
Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.

- WIKLANDER, L. and ANDERSON, A., 1972: The replacing efficiency of hydrogen in relation to base saturation an pH.
Geoderma, 7, 159-165.
- WILKE, B.M. und ZECH, W., 1987: Mineralogies of silt and clay fractions of twelve soil profiles in the Bolivian Andes (Calla-way Region).
Geoderma, 39, 193-209.
- WILSON, M. J., BAIN, D. C. and DUTHIE, D. M. L., 1984: The soil clays of Great Britain. II. Scotland.
Clay Miner. 19, 709-735.
- WILSON, M. J., 1986: Mineral weathering processes in podzolic soils on granitic materials and their implications for surface water acidification.
J. Geol. Soc., 143, 691-697.
- WOLLAST, R., 1967: Kinetics of the alteration of K-feldspar in buffered solutions at low temperature.
Geochim. Cosmochim. Acta, 31, 635-648.
- YOSHINAGA, N., 1966: Chemical composition and some thermal data of eighteen allophanes from Ando soils and weathered pumices.
Soil Sci. Plant Nutr., 12/2, 47-54.
- ZEZWSCHWITZ, E. v., 1980: Analytische Kennwerte typischer Humusformen westfälischer Bergwälder.
Z. Pflanzenern. Bodenkde., 143, 692-700.
- ZIERL, H. 1972: Der Hochwald. Untersuchungen über die Fichtenbestände in den Hochlagen des Bayerischen Waldes.
Forstwiss. Forsch., Beih. 2, *Forstwiss. Cbl.*, Heft 33.
- ZIESAK, M., 1988: Über die Borgehalte ausgewählter Böden in den Hochlagen des Bayerischen Waldes.
Dipl. Arb., Univ. München.
- ZÖTTL, H. W., STAHR, K. und KEILEN, K., 1977: Bodenentwicklung und Standortseigenschaften im Gebiet des Bärhaldengranits (südl. Hochschwarzwald).
Allg. Forst- u. Jagdztg., 148, 185-197.

- ZÖTTL, H.W. und MIES, E., 1983a: Die Fichtenerkrankung in den Hochlagen des Südschwarzwaldes.
Allg. Forst- u. Jagdztg., 154, 110-114.
- ZÖTTL, H.W. und MIES, E., 1983b: Nährelementversorgung und Schadstoffbelastung von Fichtenökosystemen im Südschwarzwald unter Immissionseinfluß.
Mitteilgn. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 38, 429-434.
- ZÖTTL, H.W., 1985: Waldschäden und Nährelementversorgung.
Düsseldorfer Geobot. Kolloq., 2, 31-41.

9. Tabellenanhang

Standort HOHER BOGEN (V)

Topographische Karte 1:50 000
L 6742 Waldmünchen

	Rechts-Wert	Hoch-Wert
Profil V/A	42 67 450	54 56 150
Profil V/B	42 67 650	54 56 000
Profil V/C	42 67 800	54 55 810
Profil V/D	42 67 900	54 55 760

Standort KOHLSCHACHTEN (II) und
Standort ENZIANFILZ (VII)

Topographische Karte 1:25 000
6946 Hirschbach

	Rechts-Wert	Hoch-Wert
Profil II/A	46 01 800	54 34 080
Profil II/B	46 01 890	54 33 780
Profil II/C	46 02 020	54 33 660
Profil VII/A	46 00 470	54 35 620
Profil VII/B	46 00 500	54 35 690
Profil VII/C	46 00 440	54 35 800
Profil VII/D	46 00 525	54 35 910
Profil VII/E	46 00 490	54 36 075
Profil VII/F	46 00 240	54 35 855

Standort RACHEL (III)

Topographische Karte 1:25 000
7046 Spiegelau

	Rechts-Wert	Hoch-Wert
Profil III/A	46 01 480	54 27 900
Profil III/B	46 01 450	54 27 660
Profil III/C	46 01 380	54 27 770
Profil III/D	46 01 260	54 27 850
Profil III/E	46 01 610	54 27 710

Standort LACKENBERG (I)

Topographische Karte 1:50 000
L 6944 Zwiesel

	Rechts-Wert	Hoch-Wert
Profil I/B	45 95 380	54 41 480
Profil I/A	45 95 760	54 41 480

Standort LUSEN (IV)

Topographische Karte 1:25 000
7047 Finsterau

	Rechts-Wert	Hoch-Wert
Profil IV/B	46 09 840	54 23 280
Profil IV/D	46 09 260	54 23 280

Standort	KOHLSCHACHTEN (II)		August 1987		
Profil Nr.		II/A	II/B	II/C	
Aufnahmefläche (qm)		100	100	100	
Meereshöhe (10 m)		114	115	155	
Exposition		NE	NE	NE	
Hangneigung (Grad)		2	3	2	
Artenzahl		13	15	9	
Höhe d. 1.Baumschicht (m)		25	28	20	
Höhe d. 2.Baumschicht (m)		5	11	6	
Höhe d. 1.Strauchschicht (cm)		-	250	150	
Höhe d. Krautschicht (cm)		20	20	20	
Deckung der					
1. Baumschicht (%)		60	70	70	
Deckung der					
2. Baumschicht (%)		5	10	20	
Deckung der					
1. Strauchschicht (%)		-	20	10	
Deckung der					
Krautschicht (%)		95	50	40	
Deckung der					
Moosschicht (%)		30	-	15	
Lichtzahl		5.3	6.1	5.5	
Temperaturzahl		3.3	3.2	3.4	
Kontinentalitätszahl		4.2	2.7	4.3	
Feuchtezah		6.4	5.4	6.8	
Reaktionszahl		2.1	2.1	2.0	
Stickstoffzahl		2.6	2.6	2.5	

Baum- und Straucharten

Picea abies	81	100,0	4.1	4.1	4.1
Picea abies	82	100,0	R	R	R
Picea abies	K	66,7		+	+
Fagus sylvatica	81	66,7		1.1	1.1
Fagus sylvatica	82	66,7		1.1	1.1
Fagus sylvatica	S	66,7		1.1	1.1
Fagus sylvatica	K	66,7		+	+
Sorbus aucuparia	K	66,7		+	+

Differentialarten

Deschampsia flexuosa	100,0	3.3	2.3	3.3
Luzula sylvatica s.l.	100,0	2.1	2.2	1.2
Polytrichum formosum	66,7	2.3	2.2	
Athyrium distentifolium	33,3	+		
Sphagnum (cf) nemoreum	33,3	2.3		
Polytrichum commune	66,7	3.3	1.2	
Trientalis europaea	33,3	1.1		
Oxalis acetosella	33,3		1.2	
Maianthemum bifolium	100,0	1.1	1.1	+
Fagus sylvatica	66,7		1.1	1.1
Polygonatum verticillatum	33,3		+	

Tab.A.2.: Vegetationsliste für den Standort Kohlschachten.

Fortsetzung Tab.A.2.:

Standort KOHLSCHACHTEN (II) August 1987 .

Profil Nr. II/A II/B II/C

Sonstige Kormophyten

Picea abies	100,0	4.1	4.1	4.1
Dryopteris				
austriaca s.str.	100,0	+	+	+
Calamagrostis villosa	100,0	3.3	1.3	3.3
Vaccinium myrtillus	100,0	+	+	+
Sorbus aucuparia	33,3		+	
Nordus stricta	33,3		3.3	
Juncus effusus	33,3			+

Sonstige Thallophyten

Dicranum scoparium	66,7	1.2	1.2	
--------------------	------	-----	-----	--

Standort RACHEL (III)

August 1988

Profil Nr.

III/A III/B III/C III/D III/E

Aufnahmefläche (cm)	100	100	100	100	100
Meereshöhe (10 m)	137	135	135	135	139
Exposition	W	W	W	W	W
Hangneigung (Grad)	2	10	5	5	12
Artenzahl	7	8	6	11	12
Höhe d. 1.Baumschicht (m)	18	25	23	23	25
Höhe d. 2.Baumschicht (m)	6	5	10	13	8
Höhe d. 1.Strauchschicht (cm)	180	-	-	-	180
Höhe d. Krautschicht (cm)	20	20	20	30	20
Deckung der					
1. Baumschicht (%)	40	50	50	40	60
Deckung der					
2. Baumschicht (%)	2	5	20	20	10
Deckung der					
1. Strauchschicht (%)	2	-	-	-	+
Deckung der					
Krautschicht (%)	90	95	85	90	90
Deckung der					
Moosschicht (%)	5	5	-	5	25
Lichtzahl	4.9	5.6	4.6	5.0	5.4
Temperaturzahl	3.0	3.5	3.0	3.3	3.4
Kontinentalitätszahl	3.5	4.3	2.4	3.8	4.1
Feuchtezahl	5.0	6.9	5.0	6.2	6.6
Reaktionszahl	2.0	2.0	2.0	2.3	2.0
Stickstoffzahl	3.0	2.4	3.0	3.3	2.5

Baum- und Straucharten

Picea abies	81	100,0	4.1	4.1	3.2	4.1	4.1
Picea abies	82	100,0	1.1	R	2.1	R	R
Picea abies	S	40,0	R				R

Differentialarten

Deschampsia flexuosa	100,0	4.4	3.3	4.3	3.3	3.4
Luzula sylvatica s.l.	100,0	3.3	1.1	4.3	3.3	2.2
Polytrichum formosum	80,0	+	R		1.2	2.2
Athyrium distentifolium	20,0				2.1	
Sphagnum (cf) nemoreum	20,0					+
Soldanella montana	40,0			+		+
Oxalis acetosella	20,0		+			
Polygonatum verticillatum	20,0				+	

Tab.A.3.: Vegetationsliste für den Standort Rachel.

Fortsetzung Tab.A.3.:

Standort RACHEL (III)

August 1988

Profil Nr.

III/A III/B III/C III/D III/E

Sonstige Kormophyten

<i>Picea abies</i>	100,0	4.1	4.1	2.1	4.1	4.1
<i>Dryopteris</i>						
<i>austriaca</i> s.str.	80,0	+	+		2.2	+
<i>Calamagrostis</i>						
<i>villosa</i>	60,0		4.4		4.4	4.3
<i>Vaccinium myrtillus</i>	20,0					+
<i>Prenanthes purpurea</i>	20,0			+		
<i>Streptopus</i>						
<i>amplexifolius</i>	20,0					+
<i>Nordus stricta</i>	20,0			+		
<i>Agrostis stolonifera</i>	20,0				+	
<i>Deschampsia</i>						
<i>caespitosa</i>	20,0				+	
<i>Blechnum spicant</i>	20,0					+

Sonstige Thallophyten

<i>Dicranum scoparium</i>	60,0	+	R			1.2
<i>Pohlia nutans</i>	40,0	+			+	

Standort ENZIANFILZ (VII)

August 1987

Profil Nr. VII/A VII/B VII/C VII/D VII/E VII/F

Aufnahmefläche (qm)	100	100	100	100	100	100
Meereshöhe (10m)	134	133	131	130	127	127
Exposition	-	NNE	N	NNE	NNE	NNE
Hangneigung (Grad)	0	3	10	8	12	12
Artenzahl	15	11	11	12	12	15
Höhe d. 1.Baumschicht (m)	17	18	20	20	8	22
Höhe d. 2.Baumschicht (m)	8		6			12
Höhe d. 1.Strauchsch.(cm)	200					
Höhe d. Krautschicht (cm)	30	30	15	30	30	30
Deckung der						
1.Baumschicht (%)	30	70	60	60	20	60
Deckung der						
2.Baumschicht (%)	30		5			10
Deckung der						
1.Strauchschicht (%)	+					
Deckung der						
Krautschicht (%)	50	50	70	80	95	70
Deckung der						
Moosschicht (%)	30	20	10	10	+	30
Lichtzahl	5.3	5.5	5.0	5.4	5.4	5.4
Temperaturzahl	3.1	3.4	3.3	3.4	3.6	3.5
Kontinentalitätszahl	4.5	4.4	3.8	4.1	3.6	4.8
Feuchtezahl	6.9	6.9	6.0	6.6	6.6	6.9
Reaktionszahl	2.0	2.0	2.1	2.1	2.1	2.0
Stickstoffzahl	2.9	2.5	2.8	2.6	2.7	2.3

Baum- und Straucharten

Picea abies	81	100,0	3.1	4.3	4.1	4.1	2.2	4.1
Picea abies	82	50,0	3.1		1.1			1.1
Picea abies	S	16,7	+					
Sorbus aucuparia	K	33,3	+		R			

Differentialarten

Deschampsia								
flexuosa	100,0	3.2	3.5	3.5	3.3	3.2	1.3	
Luzula								
sylvatica s.l.	100,0	+2	1.3	3.4	2.3	2.4	1.3	
Polytrichum								
formosum	83,3	2.3	2.2	1.3	1.3		3.3	
Athyrium								
distentifolium	66,7			1.3	1.3	1.3	+	
Sphagnum (CF)								
nemoreum	100,0	1.3	2.3	+	2.2	+2	1.3	
Polytrichum commune	66,7		+2		+2	+2	+2	
Trientalis europaea	66,7	1.3	1.2		+	1.3		
Soldanella montana	66,7			+	1.2	+2	+2	
Barbilophozia								
cycopodioides	16,7	+2						
Homogyne alpina	50,0	+	+2		+			

Tab.A.4.: Vegetationsliste für den Standort Enzianfilz.

Fortsetzung Tab.A.4.:

Standort ENZIANFILZ (VII)

August 1987

Profil Nr.

VII/A VII/B VII/C VII/D VII/E VII/F

Sonstige Kormophyten

Picea abies	100,0	3.1	4.3	4.1	4.1	2.2	4.1
Dryopteris							
austriaca s.str.	83,3		+	+	+	1.1	1.1
Calamagrostis							
villosa	100,0	1.3	3.5	3.4	4.5	4.3	4.4
Vaccinium myrtillus	50,0	4.2	1.3			2.4	
Sorbus							
aucuparia	33,3	+		R			
Carex							
canescens	16,7	+					
Streptopus							
amplexifolius	16,7					+	
Huperzia selago	16,7						+ .2

Sonstige Thallophyten

Dicranum scoparium	50,0	2.3		+			1.2
Bazzania trilobata	33,3	+ .2					+ .2
Dicranodontium							
denudatum	33,3	+ .2					+ .2

<u>Standort HOHER BOGEN (V)</u>		August 1987			
Profil Nr.		V/A	V/B	V/C	V/D
Aufnahmefläche (qm)		100	100	100	50
Meereshöhe (10 M)		100	101	104	104
Exposition		SW	NE	NW	NW
Hangneigung (Grad)		15	7	5	15
Artenzahl		15	14	12	13
Höhe d. 1.Baumschicht (m)		20	14	7	5
Höhe d. 2.Baumschicht (m)		12			
Höhe d. 1.Strauchschicht (cm)				150	250
Höhe d. Krautschicht (cm)		20	40	40	35
Deckung der					
1. Baumschicht (%)		70	60	10	10
Deckung der					
2. Baumschicht (%)		15			
Deckung der					
1. Strauchschicht (%)				15	30
Deckung der					
Krautschicht (%)		1	20	90	90
Deckung der					
Moosschicht (%)		1	10	+	+
Lichtzahl		3.3	4.0	5.4	5.5
Temperaturzahl		4.9	4.9	3.7	3.1
Kontinentalitätszahl		2.5	2.7	4.7	3.7
Feuchtezah		5.2	5.8	6.8	6.7
Reaktionszahl		4.2	3.4	2.1	2.0
Stickstoffzahl		6.9	5.9	2.7	3.0
<u>Baum- und Straucharten</u>					
Picea abies	B1	50,0		1.1	1.1
Picea abies	B2	25,0	1.1		
Picea abies	S	50,0		2.1	3.3
Picea abies	K	75,0	+	+	
Fagus sylvatica	B1	50,0	4.1	4.1	
Fagus sylvatica	S	50,0		+	2.2
Fagus sylvatica	K	75,0	1.1	2.1	+
Sorbus aucuparia	S	50,0		+	+
Sorbus aucuparia	K	25,0	+		
Acer pseudoplatanus	B1	50,0	2.1	1.1	
Acer pseudoplatanus	K	75,0	1.1	+	R
Abies alba	S	25,0			+
<u>Differentialarten</u>					
Deschampsia flexuosa		50,0		+2	4.5
Polytrichum formosum		50,0	+2	1.2	
Oxalis acetosella		50,0	+2		
Maianthemum bifolium		25,0		+	
Fagus sylvatica		75,0	4.1	2.1	+
Polygonatum verticillatum		50,0	+2	+2	
Acer pseudoplatanus		75,0	2.1	1.1	R
Rubus idaeus		50,0		1.1	+

Fortsetzung Tab. A.5.:

<u>Standort HOHER BOGEN (V)</u>		August 1987			
Profil Nr.		V/A	V/B	V/C	V/D
<u>Sonstige Kormophyten</u>					
Picea abies	100,0	1.1	+	2.1	3.3
Dryopteris					
austriaca s.str.	100,0	1.1	2.2	+	+
Calamagrostis villosa	75,0	+		3.5	1.3
Vaccinium myrtillus	75,0		+2	3.5	2.4
Sorbus aucuparia	50,0	+		+	
Carex canescens	50,0		1.1	+2	
Prenanthes purpurea	25,0	R			
Agrostis stolonifera	25,0	+2			
Paris quadrifolia	25,0	+2			
Carex pilulifera	25,0		+		
Carex brizoides	25,0		1.3		
Epilobium angustifolium	25,0			+	
Lycopodium annotinum	25,0			1.3	
Abies alba	25,0				+
Athyrium filix-femina	25,0				R
<u>Sonstige Thallophyten</u>					
Dicranum scoparium	100,0	1.2	1.1	+2	+2
Pohlia nutans	50,0	+2	+		
Cladonia sp.	50,0	+			+2
Plagiothecium curvifolium	25,0		+		
Lophocolea heterophylla	25,0				+3

Standort: Kohlschachten (Granit)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (> 2 mm) /	gS	mS	fS	ΣS %	gU	mU	fU	ΣU	T /	Boden- art (< 2 mm)
Eisen- humus- podsol (II/A)	Ae	10	27	23	16	66	6	12	6	24	10	1S
	Bsh	10	21	16	19	56	9	12	9	30	14	1S
	B(v)s	10	21	16	15	52	11	12	11	34	14	1S
	Bsv	15	18	18	18	54	11	12	7	30	16	1S
	IIcBv	20	32	26	14	72	5	8	6	19	9	1S
	BvCv1	20	35	30	11	76	3	8	4	15	9	1S
	BvCv2	20	32	26	15	73	4	8	6	18	9	1S
Braunerde- Podsol (II/B)	Aeh	10	21	17	14	52	8	11	9	28	20	sL
	Ahe	10	25	25	9	59	2	7	12	21	20	sL
	Bvs	10	17	21	7	55	9	11	12	32	13	1S
	Bsv	10	28	20	15	63	15	12	12	29	8	1S-us
	CvBv	20	14	22	23	59	17	9	7	33	8	us-1S
	IIbVcV	30	21	31	24	78	5	6	7	18	4	us
	IIICv	70	21	32	26	79	8	3	6	17	4	us
Eisen- humus- podsol (II/C)	Ahe	10	23	21	16	60	8	9	7	24	16	1S
	Bsh	10	21	20	12	53	5	8	10	23	24	sL
	Bhs	15	10	16	22	48	15	10	11	36	16	sL
	Bsv	25	26	27	11	64	5	10	7	22	14	1S
	IIcBv	25	20	21	21	62	9	10	8	27	11	1S
	III(Bv)Cv	60	23	27	22	72	6	7	8	21	7	1S

Tab.A.6.: Skelett-und Korngrößegehalte am Standort Kohlschachten (Granit).

Standort: Rachel (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (> 2 mm) /	gS	mS	fS	ΣS %	gU	mU	fU	ΣU	T /	Boden- art (< 2 mm)
Hangley- Podsol (III/A)	A(e)h	30	6	13	19	38	18	20	10	48	14	uLS
	GoAhe	30	10	15	18	43	19	18	7	44	12	sL
	Bvs	30	12	21	20	53	11	16	8	35	12	LS
	Bsv	30	7	16	21	44	17	18	8	43	13	uLS
	Bv	40	16	18	19	53	15	13	9	37	10	LS
	IICvBv	40	19	24	21	64	12	9	7	28	8	uS
	BvCv	55	20	25	21	66	9	11	6	26	8	uS
	(Bv)Cv	65	23	30	20	73	6	12	4	22	5	uS
Podsol- Braunerde (III/B)	Aeh	20	23	17	8	48	12	18	12	32	20	sL
	(Bs)Aeh	35	18	12	10	48	16	12	8	36	16	sL
	Bsv	35	21	29	19	59	5	7	7	19	12	LS
	BvI	40	27	28	18	73	7	8	5	20	7	LS
	Bv2	40	27	23	20	70	10	8	6	24	6	LS
	IICvBv	60	21	24	24	69	14	9	4	27	4	uS
	BvCv	60	25	27	22	74	10	8	4	22	4	uS
Braunerde- Podsol (III/C)	Ahe	10	12	14	15	47	9	12	10	31	22	sL
	Bvs	10	10	13	15	38	14	15	11	40	22	suL
	Bsv	40	17	23	20	60	10	10	7	27	13	LS
	Bv	55	25	19	17	62	11	13	2	26	12	LS
	IICvBv	65	9	21	27	57	17	14	3	34	9	LS
	BvCv	65	21	12	26	60	19	11	3	33	7	uS

Tab.A.7.: Skelett- und KorngröÙengehalte am Standort Rachel (Paragneis).

Standort: Rachel (Paragneis) - Fortsetzung - Tab. A.7.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (>2 mm) /	gS	mS	fS	±S %	gU	mU	fU	±U	T	Boden- art (<2 mm)
Hangley- Podsol (III/D)	GoAhe	10	4	7	12	23	11	17	17	45	32	stL
	GoBsv	60	13	11	15	39	7	14	12	33	28	stL
	IIcVbv1	60	16	23	18	57	16	17	5	38	5	uS
	CvBv2	50	19	22	21	62	11	15	4	30	8	uS
Hangley- Podsol (III/E)	Aeh	75	17	14	18	49	11	13	10	34	17	1S
	GoBhs	75	12	16	24	52	15	11	7	33	15	1S
	(Gr)Bv	75	26	30	16	72	7	7	6	20	8	1S
	IIcVbv	80	7	8	28	43	27	17	5	49	8	uS

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (>2 mm) /	gS	mS	fS	≤S %	gU	mU	fU	≤U	T /	Boden- art (<2 mm)
Gley- Podsol (VII/A)	Aeh	10	13	21	19	53	11	11	9	31	16	IS
	Bhs	30	13	21	21	55	11	13	8	32	13	IS
	B(h)s	30	15	18	26	59	11	11	6	28	13	IS
	GoBvs	40	20	23	18	61	9	10	5	24	15	IS
	GoB(s)v	40	7	16	26	49	16	18	9	43	8	uS-uIS
	(Bv)Gr	60	11	19	26	56	12	15	7	34	10	IS
	IICvBv	70	10	20	28	58	10	18	10	38	14	IS
Eisen- Humus- Podsol (VII/B)	Ahe	10	15	17	21	53	12	14	7	33	14	IS
	Bsh	30	21	18	21	60	12	10	6	28	12	IS-IS
	Bhs	10	17	14	18	49	16	15	11	42	9	uIS
	Bsv	20	10	16	22	48	17	17	7	41	11	IS
	Bv	40	14	16	24	54	13	16	7	36	10	uIS
	IICvBv	55	28	22	15	65	8	12	5	25	10	IS
	GoBvCv	65	27	22	14	63	9	13	5	27	10	IS
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Aeh	20	19	25	18	62	8	9	7	24	14	IS
	Bvhs	55	18	18	21	57	9	10	7	26	17	IS-sl
	B(v)s	50	26	24	12	62	9	12	6	27	11	IS
	IIBv	60	20	22	20	62	12	12	6	30	8	uS-IS
	BvCv1	65	33	23	16	72	9	6	6	21	7	IS
	BvCv2	80	26	27	21	74	6	8	6	20	4	uS

Tab.A.8.: Skelett-und Korngrößengehalte am Standort Enzianfilz (Paragneis).

Standort: Enzianfilz (Paragneis) - Fortsetzung - Tab. A.8.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (>2 mm) /	gS	mS	fS	ΣS %	gU	mU	fU	ΣU	T /	Boden- art (<2 mm)
Braunerde- Podsol (VII/D)	Aeh1	20	10	17	23	50	13	12	9	34	16	1S
	Aeh2	40	19	22	16	57	11	9	8	28	15	1S
	Bsv	60	31	30	18	79	5	4	6	15	6	1S
	Bsv	60	26	22	17	65	9	10	7	26	9	1S
	IIBv	65	36	20	12	68	9	9	5	23	9	1S
	CvBv	80	21	24	16	61	9	9	12	30	9	1S
Podsol- Braunerde (VII/E)	Aeh	20	16	20	16	52	15	10	9	34	14	1S
	Bsv	35	20	25	20	65	13	10	5	28	7	US
	Bv	35	17	23	22	62	13	12	6	31	7	US
	IICvBv	60	17	23	22	62	14	9	10	33	5	US
	BvCv	80	9	21	28	58	17	13	16	36	6	US
Braunerde- Podsol (VII/F)	Aeh	10	21	22	15	58	12	8	10	30	12	1S-1S
	AehBvs	30	13	21	20	54	15	9	10	34	12	1S-1S
	Bvs	45	16	21	19	56	14	10	8	32	12	1S-1S
	B(s)v	60	20	25	22	67	10	9	5	34	9	1S
	Bv	70	19	21	22	62	14	9	8	31	7	US
	IICvBv1 CvBv2	75 75	29 24	27 26	19 21	75 71	7 10	7 5	6 7	20 22	5 7	US-1S 1S

Standort: Hoher Bogen (Amphibolit)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Sk (>2 mm) /	gS	mS	fS	ΣS %	gU	mU	fU	ΣU	T /	Boden- art (<2 mm)
podsolige Braunerde (V/A)	A(e)h	35	15	9	19	43	14	13	10	37	20	sL
	A(e)hBv	35	20	10	10	40	9	14	13	36	24	sL
	Bv	35	30	8	10	48	10	15	8	33	19	sL
	IICvBv	50	25	8	10	43	16	15	10	41	16	usL
Podsol- Braunerde (V/B)	A(e)h	70	5	6	17	28	23	20	8	51	21	uL
	A(e)hBsv	70	2	5	18	25	27	20	8	55	20	uL
	Bsv	70	7	3	10	20	22	23	8	53	27	uL
	IICvBv	50	8	7	11	26	27	20	11	58	16	sLU
	BvCv	50	10	6	11	27	21	28	9	58	15	sLU
Podsol- Braunerde (V/C)	Aeh	25	8	8	22	38	14	12	10	36	26	stL
	B s v	25	12	6	19	37	19	13	6	38	25	stL-tL
	(Sw)Bv	30	16	12	20	48	18	12	5	35	17	stL-IS
	IICvBv1	80	23	16	16	55	15	13	6	34	11	IS
	CvBv2	80	21	13	17	51	20	16	3	39	10	IS
	IIIBvCv	65	17	14	17	48	19	16	5	40	12	uIS
podsolige Braunerde (V/D)	A(e)h	10	7	8	16	31	13	16	9	38	31	tL
	AhB(s)v	15	6	5	15	26	19	14	9	42	32	tL
	B(s)v	15	8	5	14	27	15	18	8	41	32	tL
	Bv	15	11	8	15	34	16	14	7	39	27	tL
	IICvBv	45	13	9	20	42	18	18	8	44	14	uIS
	IICvBv1	40	17	11	14	42	17	17	8	43	15	uIS
	CvBv2	50	15	11	16	42	13	16	13	42	16	usL

Tab.A.9.: Skelett-und Korngrößengehalte am Standort Hoher Bogen (Amphibolit).

Standort: Kohlschachten

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe _o	Fe _d	Fe _t	Al _p	Al _o mg/g	Al _d	Al _t	Mn _p	Mn _o	Mn _d	Mn _t /
Eisen- Humus- Podsol (II/A)	Ae	1.79	3.15	5.88	13.64	0.83	1.38	1.28	54.21			-	0.222
	Bsh	13.88	20.25	26.87	45.42	3.21	3.87	4.44	61.32			-	0.357
	B(v)s	20.64	14.45	36.97	50.20	3.43	4.62	4.64	75.18			-	0.537
	Bsv	1.90	5.07	13.12	41.35	3.52	5.80	5.30	79.12			0.153	0.579
	IICvBv	0.34	1.26	6.80	39.73	3.05	6.33	5.01	92.09			0.187	0.694
	BvCv1	0.05	1.07	5.66	36.59	1.87	5.68	5.27	79.83			0.175	0.635
	BvCv2	0.27	1.83	10.57	36.89	1.85	6.47	6.75	77.98			0.156	0.472
Braunerde- Podsol (II/B)	Aeh	14.51	25.08	39.44	9.11	4.15	5.36	6.29	58.31	0.024		-	0.292
	Ahe	20.20	28.49	39.31	48.96	5.28	7.54	8.51	63.15	0.083	0.174	0.142	0.361
	Bvs	48.40	29.87	51.52	54.99	16.77	16.35	17.89	77.65	0.054	-	0.296	0.551
	Bsv	9.76	12.82	19.88	82.86	16.03	14.45	15.81	91.43	0.027	-	0.203	0.586
	CvBv	1.17	2.15	6.61	53.34	5.11	10.67	8.23	97.63	0.018	0.117	0.154	0.620
	IIBvCv	0.25	0.97	49.16	52.66	2.39	8.94	5.07	108.83	-	0.148	0.207	0.779
	IICv	0.13	0.81	3.77	61.33	1.66	7.86	3.14	108.34	-	0.119	0.226	0.985
Eisen- Humus- Podsol (II/C)	Ahe	2.48	3.25	3.62	12.34	1.40	1.35	1.17	55.12			-	0.315
	Bsh	28.13	33.90	53.32	76.41	4.35	5.78	5.77	58.62			-	0.501
	Bhs	10.81	30.23	38.51	79.66	4.66	9.06	9.1	73.20			-	0.524
	Bsv	4.78	10.32	15.16	54.11	11.42	13.03	15.11	90.94			-	0.620
	IICvBv	0.60	2.25	6.73	46.38	6.84	10.55	9.48	90.89			0.138	0.620
	IIBvCv	0.04	0.56	3.38	39.75	2.07	6.50	3.78	95.05			0.201	0.633
	IICv												

Tab.A.10.: Fe-,Al- und Mn-Fractionen in Leitpedons am Standort Kohlschachten (Granit).
Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_p).

Standort: Rachel

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe ₀	Fe _d	Fe _t	Al _p mg/g	Al ₀	Al _d	Al _t	Mn ₀	Mn _d	Mn _t /
Hangley- Podsol (III/A)	A(e)h	4.66	8.10	15.85	25.05	1.43	2.16	2.31	55.31	-	-	-
	GoAeh	5.37	11.84	33.03	52.37	3.11	4.96	6.30	73.79	-	0.118	0.268
	Bvs	3.05	8.32	25.68	53.25	2.97	4.70	5.88	69.07	-	0.118	0.407
	Bsv	0.93	5.85	16.65	44.03	3.42	6.16	6.72	81.11	-	0.307	0.547
	Bv	0.28	1.71	13.21	38.19	3.36	6.62	7.28	81.11	0.195	0.505	0.653
	IICvBv	0.91	1.52	13.70	38.40	3.46	5.28	6.28	74.62	0.205	0.554	0.690
	BvCv	0.12	1.44	16.74	49.41	1.65	4.86	5.24	106.11	0.438	0.772	0.789
	(Bv)Cv	0.05	1.14	22.04	54.43	1.32	4.08	5.63	131.27	0.334	0.819	1.037
Podsol- Braunerde (III/B)	Aeh	5.48	8.51	20.46	27.16	3.45	3.38	5.82	57.97	-	-	-
	(Bs)Aeh	4.47	10.05	21.97	30.91	3.21	3.10	6.03	68.79	-	-	-
	Bhs	3.44	13.00	24.17	50.21	2.84	3.57	6.65	64.77	-	0.076	0.249
	B(s)v	0.72	3.41	9.82	31.39	4.07	5.18	7.30	84.06	0.113	0.199	0.416
	Bv	0.55	3.11	10.40	27.53	3.77	5.76	7.57	76.50	0.158	0.243	0.361
	IICvBv	0.42	2.37	12.27	34.61	3.50	5.75	7.65	81.31	0.225	0.378	0.525
	BvCv	0.14	1.4	16.62	59.56	1.87	4.78	5.56	132.26	0.416	0.725	1.127
Braunerde- Podsol (III/C)	Aeh	5.71	9.87	20.81	34.41	4.74	5.74	6.66	71.85	-	-	-
	Bvs	6.59	12.40	31.01	41.92	4.46	6.26	8.30	82.01	-	0.133	0.216
	Bsv	3.90	10.76	22.81	52.11	3.33	5.39	8.15	99.22	0.097	0.270	0.450
	Bv	2.67	4.02	18.56	46.19	6.42	9.55	8.59	89.09	0.148	0.266	0.530
	IICvBv	0.86	2.57	14.10	42.16	3.58	9.11	7.62	87.23	0.212	0.336	0.534
	BvCv	0.23	1.83	10.24	42.18	1.81	5.99	4.84	89.25	0.277	0.426	0.720

Tab.A.11.: Fe-,Al- und Mn-Fraktionen in Leitpedons am Standort Rachel (Paragneis).
Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_p).

Standort: Rachel – Fortsetzung – Tab. A.11.:

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe _o	Fe _d	Fe _t	Al _p mg/g	Al _o	Al _d	Al _t	Mn _o	Mn _d	Mn _t /
Hanggley- Podsol (III/D)	GoAhe	9.56	24.76	35.62	45.59	6.38	5.52	8.51	83.19	-	-	-
	GoBsv	5.87	16.23	32.44	45.50	3.84	3.70	6.24	83.58	-	0.231	0.420
	IIICvBv1	0.45	2.35	13.53	47.65	3.89	5.17	7.12	97.50	0.143	0.342	0.586
	CvBv2	0.14	1.43	11.9	47.84	1.38	3.87	4.52	103.69	0.278	0.425	0.752
Hanggley- Podsol (III/E)	Aeh	1.95	10.85	18.73	32.67	2.56	4.80	5.74	82.35	-	-	-
	GoBhs	35.45	32.77	51.19	75.72	19.29	24.21	26.10	98.13	-	0.143	0.398
	(Gr)Bv	1.49	8.60	18.24	50.32	8.45	25.42	17.07	104.22	0.321	0.407	0.651
	IIICvBv	0.51	2.18	16.75	46.61	2.41	9.89	7.14	95.78	0.339	0.550	0.863

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe _o	Fe _d	Fe _t	Al _p mg/g	Al _o	Al _d	Al _t	Mn _d	Mn _t /
Gley-Podsol (VII/A)	Aeh	5.23	12.83	15.61	30.48	3.34	5.35	5.77	76.30	-	0.125
	Bsh	8.83	26.29	62.99	73.99	6.06	6.94	11.55	86.32	-	0.214
	B(h)s	5.12	15.73	29.02	63.23	3.62	5.23	8.32	89.51	0.038	0.268
	GoBvs	2.51	7.29	14.98	52.50	2.45	3.92	4.85	85.53	0.059	0.285
	GoB(s)v	1.63	4.00	12.62	51.58	2.54	3.42	4.02	88.02	0.060	0.315
	Gr	3.75	4.89	7.91	47.07	2.54	3.88	4.19	88.46	0.075	0.270
	IIcVbV	0.98	1.96	8.72	56.07	2.36	4.15	3.13	103.13	0.101	0.382
Eisen- Humus- Podsol (VII/B)	Ahe	3.54	5.12	11.61	22.08	2.14	2.95	0.43	69.46	0.029	0.050
	Bsh	3.56	12.34	40.48	63.19	3.12	4.61	3.99	81.91	0.033	0.147
	Bhs	3.88	11.83	29.94	64.62	1.81	2.95	5.12	89.76	0.075	0.198
	Bvs	2.58	6.27	18.71	54.33	2.09	3.25	3.31	85.74	0.131	0.223
	Bv	1.27	3.61	15.42	51.05	2.31	3.24	5.07	87.84	0.150	0.318
	IIcVbV	0.42	1.62	10.08	47.07	2.45	3.31	4.47	96.08	0.161	0.337
	GoBvCv	0.36	1.33	9.42	48.15	6.26	5.18	6.14	89.29	0.069	0.336
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Aeh	6.60	13.70	21.53	38.25	3.24	3.65	5.98	51.33	0.036	0.190
	Bvhs	7.50	21.70	38.18	63.93	3.79	4.01	6.59	71.26	0.057	0.244
	B(v)s	5.68	14.77	20.35	55.64	3.88	4.06	5.89	75.83	0.059	0.295
	IIBv	2.54	4.89	10.50	44.79	3.08	6.87	8.04	70.79	0.081	0.337
	BvCv1	0.39	5.91	9.38	45.17	2.97	3.34	6.14	75.23	0.106	0.340
	BvCv2	0.38	1.58	4.39	42.55	2.82	4.25	5.38	81.69	0.165	0.456

Tab.A.12.: Fe-, Al- und Mn-Fractionen in Leitpedons am Standort Enzianfilz (Paragneis).
Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_p).

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe _o	Fe _d	Fet	Al _p mg/g	Al _o	Al _d	Al _t	Mn _o	Mn _d	Mn _t /
Braunerde- Podsol (VII/D)	Aeh1	5.16	9.44	9.68	20.78	3.17	3.49	4.04	59.68	-	-	0.090
	Aeh2	3.27	6.65	11.63	21.98	1.66	1.56	2.49	53.58	-	0.024	0.136
	Bvs	4.09	10.05	16.77	39.13	1.88	2.88	3.03	65.30	-	0.047	0.238
	Bsv	3.01	7.69	12.07	37.67	2.03	3.04	3.43	83.12	-	0.121	0.359
	IIB(s)v CvBv	0.44 0.97	2.94 1.41	5.42 6.47	27.64 37.88	1.42 1.52	3.02 3.20	2.82 1.37	83.94 92.02	- 0.155	0.216 0.278	0.425 0.581
Podsol- Braunerde (VII/E)	Aeh	4.27	10.08	16.72	31.95	2.19	3.17	3.88	68.47	-	0.043	0.185
	Bsv	4.15	13.12	21.78	58.93	2.20	3.26	3.86	80.30	-	0.069	0.368
	Bv	1.02	3.65	14.53	54.54	2.14	3.02	3.38	87.42	0.146	0.205	0.506
	IICvBv	0.51	1.87	10.49	51.22	2.56	3.48	4.18	91.66	0.184	0.242	0.602
	BvCv	0.47	1.70	9.18	50.38	1.47	2.36	2.49	87.59	0.251	0.324	0.684
Braunerde- Podsol (VII/F)	Aeh	4.41	10.33	14.18	29.10	2.25	3.76	3.39	68.47	-	0.034	0.162
	AehBvs	5.95	13.29	18.97	35.05	2.32	3.53	3.85	63.27	-	0.036	0.185
	Bvs	5.49	17.42	23.60	53.16	2.24	3.64	4.56	79.29	-	0.057	0.312
	B(s)v	2.51	7.79	11.99	47.61	2.18	3.21	3.37	108.90	-	0.114	0.412
	Bv IICvBv1 CvBv2	1.54 0.36 0.44	4.46 1.45 1.91	9.30 5.41 6.05	38.75 36.28 38.08	3.45 1.86 1.81	4.64 3.59 3.62	5.55 3.28 3.28	64.25 102.86 62.48	0.119 0.215 0.212	0.156 0.233 0.235	0.435 0.549 0.562

Standort: Hoher Bogen (Amphibolit)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Fe _p /	Fe _o	Fe _d	Fe _t	Al _p	Al _o mg/g	Al _d	Al _t	Mn _p	Mn _o	Mn _d	Mn _t /
podsolige Braunerde (V/A)	A(e)h	10.410	12.12	26.69	93.79	2.70	2.98	3.95	66.44	0.071	0.158	0.493	1.93
	A(e)hBv	7.810	12.29	23.79	98.75	3.12	4.14	4.93	65.54	0.065	0.214	0.532	2.04
	Bv	5.860	10.57	18.92	90.33	8.20	11.35	12.08	73.47	0.034	0.154	0.372	1.86
	IIcBv	5.050	3.22	11.73	81.14	11.40	11.25	15.79	81.86	0.020	0.129	0.204	2.10
Podsol- Braunerde (V/B)	A(e)h	11.106	15.3	19.89	84.02	1.40	1.70	1.97	54.14	-	-	0.159	1.32
	A(e)hBsv	10.018	18.75	24.65	78.39	3.71	5.33	5.66	63.27	0.038	0.182	0.284	1.33
	Bsv	9.010	20.67	25.39	74.20	10.61	8.89	14.58	70.11	0.028	0.208	0.232	1.14
	IIcBv	0.471	1.89	11.30	41.39	3.23	7.01	5.88	48.55	-	0.229	0.395	0.85
	BvCv	0.346	1.93	10.80	52.52	2.64	5.92	5.10	67.61	-	0.210	0.447	1.12
Podsol- Braunerde (V/C)	Aeh	14.720	4.80	34.89	107.85	2.26	2.35	5.49	62.52	0.046	0.124	0.554	1.82
	B s v	9.802	15.90	44.29	112.12	4.41	6.93	11.05	73.62	0.061	0.215	0.620	1.91
	Bv	2.440	3.85	25.54	102.70	4.87	8.26	10.44	85.50	0.028	0.268	0.443	1.82
	IIcBv1	0.674	2.01	17.27	101.63	2.81	6.44	6.93	82.38	-	0.225	0.459	1.78
	CvBv2	0.252	1.41	16.47	102.61	1.71	5.12	5.23	83.35	-	0.296	0.613	1.85
	IIIBvCv	0.149	1.69	25.94	114.25	1.27	3.56	4.75	90.33	-	0.321	0.658	1.97
podsolige Braunerde (V/D)	A(e)h	9.605	5.01	50.50	108.81	1.53	2.50	6.87	93.19	0.018	-	0.581	1.65
	AnB(s)v	9.150	5.36	51.80	108.97	2.41	3.88	8.34	94.62	0.031	0.150	0.602	1.62
	B(s)v	6.790	8.96	49.86	108.58	6.05	0.73	14.38	106.84	0.050	0.240	0.720	1.77
	Bv	4.630	4.77	42.57	105.85	6.38	11.61	15.52	116.55	0.060	0.366	0.931	1.82
	IIcBv	0.718	1.97	34.65	99.64	1.88	6.02	8.56	107.92	-	0.410	0.895	1.78
	IIIcBv1	0.244	1.70	45.19	107.39	1.61	5.12	8.53	119.62	-	0.453	1.047	1.89
	CvBv2	0.139	1.77	55.67	92.72	2.43	5.06	9.70	86.89	-	0.670	1.360	1.11

Tab.A.13.: Fe-Al- und Mn-Fraktionen in Leitpedons am Standort Hoher Bogen (Amphibolit).
Die Daten sind auf humusfreie Feinerde bezogen (Ausnahme Fe_p).

Standort: Kohlischachten (Granit)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	P _t /	C _{org} mg/g	N _t /	C _{org} /N _t	C _{org} /P _t	C _{pyr} /mg/g/
Humus- Eisen- Podsol (II/A)	Of	6 - 4.5	1.08	480.65	18.74	26	445	23.76
	Oh	4.5- 0	1.99	353.23	18.51	19	177	68.98
	Ae	- 3	0.67	17.56	0.83	21	26	5.61
	Bsh	- 5	1.05	33.27	1.69	20	31	16.23
	B(v)s	- 7	0.89	18.13	0.74	25	20	17.16
	Bsv	-14	0.94	13.23	0.54	25	14	4.95
	IIcBv	-30	0.78	8.18	0.32	26	10	4.09
	BvCv1	-60	0.84	5.95	0.21	28	7	3.16
	BvCv2	-82	0.91	7.85	0.34	23	8	3.63
Braunerde- Podsol (II/B)	Of	5 - 2.5	0.97	371.44	14.28	26	384	29.70
	Oh	2.5- 0	1.65	480.90	19.33	25	292	42.24
	Aeh	- 3	1.22	79.79	4.89	16	65	20.85
	Ahe	- 9	1.21	65.23	3.29	20	54	15.70
	Bs	-15	1.32	56.50	2.94	19	43	22.83
	Bsv	-20	1.22	40.00	1.65	24	33	16.83
	CvBv	-35	1.24	14.91	0.68	22	12	7.12
	IIbBvCv	-65	1.45	8.46	0.29	29	5	3.96
	IIcCv	-85	1.72	4.20	0.11	38	2	2.11
Humus- Eisen- Podsol (II/C)	Of	3 - 0	0.82	501.25	17.90	28	611	27.06
	Oh	1 - 0	1.08	400.48	15.65	26	370	43.56
	Ahe	- 4	0.69	62.63	2.95	21	91	10.95
	Bsh	- 7	1.29	120.96	5.48	22	94	38.61
	Bhs	-18	1.13	77.02	2.91	26	68	21.97
	Bsv	-27	1.34	56.26	2.13	26	42	27.78
	IIcBv	-48	1.14	21.36	0.75	28	18	9.90
	II(bBv)Cv	-94	1.11	6.48	0.20	32	6	3.49

Tab.A.14.: Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor-Gesamtgehalte und Bioelement-
relationen in Böden am Standort Kohlischachten.

Standort: Rachel (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	Pt /	Corg mg/g	Nt /	C _{org} /N _t	C _{org} /Pt	C _{pyr.} /mg/g/
Hanggley- Podsol (III/A)	Of	6.5- 2	1.11	495.37	22.21	22	446	35.64
	Oh	2 - 0	1.25	448.65	22.02	20	359	40.26
	A(e)h	- 1	0.90	63.24	4.63	14	70	19.20
	GoAhe	-10	0.79	27.94	1.58	18	35	15.10
	Bvs	-14	0.62	18.47	0.92	20	29	10.75
	Bsv	-18	0.51	14.96	0.65	23	29	8.05
	Bv	-23	0.49	9.98	0.37	27	20	5.20
	IICvBv	-35	0.39	6.99	0.23	30	18	3.67
	BvCv	-49	0.66	5.71	0.13	44	9	2.25
	(Bv)Cv	-80	0.80	6.49	0.05	38	7	1.90
Podsol- Braunerde (III/B)	Of	7.5- 4	1.23	492.29	23.08	21	400	55.44
	Oh	4 - 0	1.55	457.80	23.03	20	295	73.26
	A e h	- 4	1.19	93.76	6.16	15	79	30.03
	(Bs)Aeh	- 8	1.15	57.97	3.81	15	50	21.05
	Bsv	-14	0.67	31.75	1.35	23	37	21.78
	Bv1	-21	0.7	13.37	0.38	35	18	6.86
	Bv2	-31	0.45	12.12	0.35	35	27	5.61
	IICvBv	-58	0.56	10.12	0.25	40	18	4.68
	BvCv	-85	0.79	4.50	0.12	38	5	1.98
Braunerde- Podsol (III/C)	Of	8.5- 3	1.36	484.81	25.30	19	356	46.20
	Oh	3 - 0	1.46	479.31	26.22	18	328	61.38
	Ahe	- 3	1.72	121.00	8.73	14	70	32.20
	Bvs	- 6	1.13	84.00	4.35	19	74	22.83
	Bsv	-21	0.84	37.50	1.92	20	44	12.47
	Bv	-32	0.59	16.75	0.83	21	29	9.70
	IICvBv	-56	0.53	12.50	0.61	21	23	6.73
	BvCv	-72	0.54	6.00	0.28	21	10	2.50

Tab.A15.: Kohlenstoff-,Stickstoff-,Phosphor-Gesamtgehalte und Bioelementrela-
tionen der Böden am Standort Rachel.

Standort: Rachel (Paragneis) - Fortsetzung - Tab. A.15.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	P _t /	C _{org} mg/g	N _t	C _{org} /N _t	C _{org} /P _t	C _{pyr.} /mg/g/
Hanggley- Podsol (III/D)	Of	9 - 5	1.25	433.83	22.64	20	347	46.86
	Oh	5 - 0	1.77	402.96	21.53	19	228	75.24
	GoAhe	0 - 9	2.68	152.75	6.08	25	57	39.33
	GoBsv	9 - 26	1.81	85.79	3.91	22	47	28.57
	IIcBv1	26 - 58	0.54	9.48	0.43	22	17	5.01
	CvBv2	58 - 79	0.54	4.74	n.b.	n.b.	9	1.51
Hanggley- Podsol (III/E)	Of	10 - 2	0.98	507.67	20.52	25	518	28.38
	Oh	2 - 0	1.21	468.59	19.52	24	387	45.54
	Aeh	0 - 5	1.42	150.02	7.91	19	107	37.62
	GoBhs	5 - 45	1.13	92.0	3.67	25	81	41.97
	GrBv	45 - 57	0.75	34.0	1.27	27	45	13.13
	IIcBv	57 - 78	0.66	9.37	0.35	27	14	3.63

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	P _t /	C _{org.} mg/g	N _t /	C _{org.} /N _t	C _{org.} /P _t	C _{dyr.} /mg/g/
Gley- Podsol (VII/A)	Of	25 -20	0.94	501.52	20.51	24	532	
	Oh	20 - 0	0.98	478.17	22.66	21	487	
	Aeh	0 -10	0.76	103.79	4.05	26	135	11.33
	Bhs	10 -14	0.75	83.18	3.62	23	110	16.17
	B(h)s	14 -21	0.67	37.16	1.99	18	55	7.62
	GoBvs	21 -29	0.64	22.93	1.29	18	34	4.83
	GoB(s)iv	29 -35	0.65	18.07	1.20	15	28	4.54
	(Bv)Gr	35 -50	0.71	28.61	1.48	19	39	6.78
	IICvBv	50 -80	0.76	14.09	0.92	15	18	2.87
Eisen- Humus- Podsol (VII/B)	Of	11 - 5	0.95	511.89	20.77	25	538	
	Oh	5 - 0	1.01	473.73	21.97	22	468	
	Ahe	0 - 9	0.64	36.46	1.90	19	56	3.56
	Bsh	9 -15	0.90	60.10	3.02	20	67	9.32
	Bhs	15 -19	0.75	40.83	1.68	24	54	8.29
	Bsv	19 -24	0.62	15.51	0.40	38	24	2.24
	Bv	24 -32	0.61	14.52	0.40	36	23	1.79
	IICvBv	32 -46	0.55	12.65	0.38	33	22	1.29
	GoBvCy	46 -90	0.58	11.45	0.31	37	19	1.21
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Of	9 - 5.5	1.32	498.24	21.73	23	377	
	Oh	5.5- 0	1.62	442.17	23.71	19	272	
	Aeh	0 - 8	1.30	177.83	5.17	34	136	10.79
	Bvhs	8 -14	1.07	49.97	2.85	17	46	9.62
	B(v)s	14 -19	0.75	27.56	1.19	23	36	6.28
	IIBv	19 -26	0.66	17.60	0.37	47	25	4.25
	BvCv1	26 -56	0.77	18.94	0.98	19	25	1.45
	BvCv2	56 -72	0.60	6.84	0.32	21	12	1.42

Tab.A.16.: Kohlenstoff-,Stickstoff-,Phosphor-Gesamtgehalte und Bioelement-
relationen der Böden am Standort Enzianfilz.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	P _t /	C _{org} mg/g	N _t /	C _{org} /N _t	C _{org} /P _t	C _{pyr.} /mg/g/
Braunerde- Podsol (VII/D)	Of	8 - 5.5	1.20	501.33	22.09	23	417	
	Oh	5.5- 0	1.45	415.29	21.68	19	286	
	Aeh 1	0 - 6	1.32	130.00	7.10	18	98	10.00
	Aeh 2	6 - 23	1.08	71.41	3.28	22	66	5.22
	Bvs	23 - 31	0.82	20.40	1.16	18	24	4.06
	Bsv	31 - 37	0.73	15.10	0.85	18	20	2.69
	IIBv	37 - 53	0.78	8.01	0.32	25	10	1.45
	CvBv	53 - 85	0.81	11.00	0.40	28	13	1.24
Braunerde- Podsol (VII/E)	Of	6.5- 2	1.54	499.49	26.64	19	324	
	Oh	2 - 0	1.77	432.28	23.01	19	244	
	Aeh	0 - 11	1.30	104.42	5.39	19	80	6.71
	Bsv	11 - 23	0.81	22.45	1.16	19	27	3.90
	Bv	23 - 34	0.75	12.43	0.47	26	16	1.82
	IICvBv	34 - 48	0.71	10.52	0.38	28	14	1.66
	BvCv	48 - 80	0.72	12.20	0.61	20	17	1.13
Braunerde- Podsol (VII/F)	Of	10 - 5	1.11	467.76	20.49	23	420	
	Oh	5 - 0	1.56	443.63	22.52	20	284	
	Aeh	0 - 5	1.20	90.83	6.56	14	75	7.23
	AehBhs	5 - 13	1.04	57.98	3.26	18	56	6.50
	Bvs	13 - 21	0.74	31.20	1.56	20	42	4.77
	Bsv	21 - 30	0.56	14.14	0.59	24	25	2.19
	Bv	30 - 40	0.58	11.35	0.45	25	19	2.19
	IICvBv1	40 - 64	0.56	4.86	0.36	13	9	0.79
	CvBv2	64 - 85	0.56	5.12	0.30	17	9	0.61

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	P _t /	C _{org} mg/g	N _t /	C _{org} /N _t	C _{org} /P _t	C _{pyr.} /mg/g/
podsolige Braunerde (V/A)	Of	4 - 3	1.43	360.82	16.41	22	252	26.40
	Oh	3 - 0	1.09	415.11	20.14	21	380	39.60
	A(e)h	0 - 10	1.07	65.78	4.35	15	62	16.83
	A(e)hBv	10 - 16	1.08	54.25	3.53	15	50	11.94
	Bv	16 - 37	0.83	45.89	2.55	18	55	18.31
	IICvBv	37 - 48	0.81	46.05	2.13	22	56	21.78
Podsol- Braunerde (V/B)	Of	9 - 3	1.00	510.53	22.86	22	510	34.98
	Oh	3 - 0	0.80	504.06	20.56	24	630	39.60
	A(e)h	0 - 11	2.02	90.24	5.0	18	44	21.12
	A(e)hBsv	11 - 21	1.49	76.40	4.28	18	51	20.19
	Bsv	21 - 51	1.32	72.21	3.49	21	54	29.30
	IICvBv	51 - 76	0.48	7.23	0.35	21	15	3.96
	BvCv	76 - 90	0.45	5.1	0.29	18	11	2.97
	Of	5.5 - 2	0.96	481.68	19.01	25	319	33.66
	Oh	2 - 0	1.4	404.57	17.15	24	360	36.30
	Aeh	-12	1.16	76.87	4.13	18	66	21.71
podsolige Braunerde (V/D)	B(s)v	-21	1.11	56.14	2.61	21	50	16.23
	Bv	-44	0.71	29.87	1.15	26	42	11.45
	IICvBv1	-75	0.53	11.99	0.47	25	22	4.62
	CvBv2	-105	0.49	3.98	0.20	20	8	2.04
	IIBvCv	>105	0.56	2.36	0.10	24	3	1.58
	Of	2.5 - 2	1.43	456.61	17.91	25	501	36.30
	Oh	2 - 0	1.25	450.11	19.44	23	288	50.82
	A(e)h	-2	1.04	90.15	4.14	22	86	23.72
	AhB(s)v	-7	1.05	69.75	3.80	21	66	16.66
	B(s)v	-19	1.07	52.98	2.62	20	49	15.44
podsolige Braunerde (V/D)	Bv	-49	0.87	30.52	1.46	21	34	10.36
	IICvBv	-66	0.55	7.47	0.37	20	13	3.10
	IICvBv1	-81	0.42	3.47	0.14	25	7	1.58
	CvBv2	-110	0.42	3.46	0.09	38	7	1.65

Tab.A.17.: Kohlenstoff-,Stickstoff-Phosphor-Gesamtgehalte und Bioelement-
relationen der Böden am Standort Hoher Bogen.

Standort: Rachel (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mg _t mg/g	Fe _t	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t /
Hanggley- Podsol (III/D)	Of	9 - 5	4.22	3.37	0.85	1.25	0.807	0.439	3.91	-	-	8.93	0.036	0.05
	Oh	5 - 0	4.2	3.32	2.0	4.35	0.807	1.25	10.54	-	-	15.37	0.037	0.057
	GoAhe	0 - 9	4.91	3.7	7.0	16.7	1.91	2.61	33.6	-	-	61.31	0.025	0.036
	GoBsv	9 - 26	4.8	3.56	8.5	22.0	2.9	3.08	38.77	0.358	0.358	71.21	0.029	0.049
	IICvBv1	26 - 58	5.6	4.82	11.9	26.85	2.95	9.17	46.89	0.581	0.581	95.94	0.04	0.127
	CvBv2	58 - 79	5.42	4.82	10.6	26.4	2.98	9.02	47.46	0.74	0.74	102.86	0.044	0.115
Hanggley- Podsol (III/E)	Of	10 - 2	3.95	2.99	1.0	1.3	1.61	0.53	3.62	-	-	5.67	0.026	0.102
	Oh	2 - 0	3.89	2.82	2.5	2.3	0.988	0.56	4.85	-	-	13.98	0.031	0.076
	Aeh	0 - 5	4.29	3.22	11.0	21.3	2.89	2.46	24.21	-	-	61.02	0.029	0.038
	GoBhs	5 - 45	5.42	4.3	13.4	22.0	2.8	5.98	63.68	0.314	0.314	82.53	0.042	0.079
	(Gr)Bv	45 - 57	5.15	4.63	13.6	24.65	3.95	8.99	47.35	0.65	0.65	98.07	0.046	0.125
	IICvBv	57 - 78	4.98	4.78	14.8	25.8	4.24	9.37	45.86	0.849	0.849	94.25	0.049	0.142

Tab.A.18.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte zweier Pedons am Standort Rachel. Übrige Pedons sind in Tab.3.3. dargestellt.

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe /cm/	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t	Mg _t mg/g	Fe _t	Mn _t	Al _t	Cu _t	Zn _t /
Braunerde- Podsol (VII/D)	Of	8 - 5.5	3.69	2.99	2.00	2.15	0.63	0.39	3.16	0.03	0.03	8.31	0.03	0.06
	Oh	5.5 - 0	3.91	3.02	2.65	4.36	0.59	0.50	6.29	0.03	0.03	17.61	0.03	0.05
	Ash1	- 6	4.15	3.30	8.05	18.16	1.73	1.50	16.13	0.07	0.07	46.31	0.02	0.04
	Ash2	-23	4.51	3.39	9.15	20.15	2.68	1.80	19.28	0.12	0.12	46.99	n.b.	0.04
	Bvs	-31	4.52	3.69	9.60	31.07	1.59	6.68	37.76	0.23	0.23	63.01	0.03	0.08
	Bsv	-37	4.72	3.89	10.55	32.08	2.14	7.96	36.69	0.35	0.35	80.96	0.03	0.10
	IIBv	-53	4.87	4.21	12.35	36.98	1.73	5.98	27.26	0.42	0.42	82.79	0.03	0.08
	CvBv	-85	4.84	4.32	13.45	32.25	2.99	8.27	37.17	0.57	0.57	90.28	0.05	0.11
Podsol- Braunerde (VII/E)	Of	6.5 - 2	3.90	3.11	0.65	1.73	0.85	0.42	3.74	0.05	0.05	8.77	0.02	0.05
	Oh	2 - 0	3.62	2.99	2.15	5.40	1.03	0.68	8.29	0.06	0.06	20.61	0.03	0.05
	Aeh	-11	4.03	3.38	12.20	21.48	2.68	2.40	26.20	0.15	0.15	56.15	0.02	0.03
	Bsv	-23	4.35	3.69	13.63	26.80	2.97	9.14	56.56	0.35	0.35	77.20	0.04	0.10
	Bv	-34	4.50	3.94	16.65	28.48	3.54	10.11	53.38	0.50	0.50	85.55	0.05	0.13
	IICvBv	-48	4.68	4.20	16.25	28.48	3.49	10.46	50.30	0.60	0.60	90.00	0.05	0.13
	BvCv	-80	4.51	4.03	17.80	29.05	3.65	10.70	49.33	0.67	0.67	85.75	0.05	0.13
Braunerde- Podsol (VII/F)	Of	10 - 5	3.85	3.17	1.05	2.90	1.00	0.72	9.36	0.07	0.07	13.78	0.03	0.06
	Oh	5 - 0	3.80	3.17	1.75	4.13	1.01	1.04	17.95	0.07	0.07	21.14	0.04	0.06
	Aeh	- 5	4.08	3.33	11.23	16.48	2.34	2.16	24.55	0.14	0.14	57.75	0.02	0.04
	AehBvs	-13	4.16	3.43	12.28	17.20	2.78	3.09	31.55	0.17	0.17	56.95	0.02	0.04
	Bvs	-21	4.40	3.60	12.85	20.55	2.89	6.93	50.25	0.30	0.30	75.03	0.03	0.08
	B(s)v	-30	4.62	3.98	14.70	23.35	3.56	8.96	46.45	0.40	0.40	106.25	0.03	0.10
	Bv	-40	4.84	4.27	14.33	23.73	3.09	8.76	38.00	0.43	0.43	63.00	0.03	0.10
	IICvBv1	-64	4.92	4.53	13.93	25.70	2.72	8.68	35.98	0.54	0.54	102.00	0.04	0.11
	CvBv2	-85	4.82	4.52	14.18	25.78	2.89	8.94	36.08	0.56	0.56	51.93	0.04	0.11

Tab.A.19.: pH-Werte und Bioelement-Gesamtgehalte in Pedons am Standort Enzianfilz. Übrige Bodenformen sind in Tab.3.4. dargestellt.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK / eff.	Ca	Mg	K mmol 1A/100 g	Na	Fe	Al ^{ges.}	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
Hanggley- Podsol (III/D)	Of	9-5	19.22	1.67	0.51	1.05	0.25	0.92	12.01	5.38	9.28	18.1
	Oh	5-0	26.26	0.79	0.72	1.06	0.99	1.40	18.99	5.67	15.58	13.6
	GoAhe	0-9	9.10	0.27	0.28	0.36	0.85	0.05	6.76	1.28	6.02	19.3
	GoBsv	9-26	9.5	0.20	0.13	0.14	0.37	0.09	7.80	-	8.58	8.8
	IIcV8v1	26-58	2.29	0.14	0.02	0.12	0.49	-	1.09	-	1.52	33.6
	Cv8v2	58-79	2.42	0.09	0.02	0.12	0.36	-	1.08	-	1.83	24.3
Hanggley- Podsol (III/E)	Of	10-2	23.81	6.90	1.63	1.13	1.03	0.56	3.75	8.33	3.91	44.8
	Oh	2-0	30.24	1.86	0.84	0.82	3.99	0.72	13.87	11.52	10.44	24.9
	Aeh	0-5	13.04	0.34	0.31	0.24	1.30	0.54	8.57	3.18	7.12	16.8
	GoBhs	5-45	9.92	0.23	0.14	0.16	3.09	0.07	5.84	-	6.20	36.5
	(Gr)Bv	45-57	3.26	0.10	0.04	0.07	0.88	0.01	1.45	-	2.16	33.3
	IIcVBv	57-78	1.84	0.08	0.01	0.08	0.19	0.00	1.07	-	1.49	18.7

10
10
10

Tab.A.20.: Kationen-Austauscheigenschaften zweier Pedons am Standort Rachel (Paragneis).
Übrige Bodenformen sind in Tab.3.8. dargestellt.

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	KAK _{eff.} /	Ca	Mg	K mmol IX/100 g	Na IX/100 g	Fe	Al _{ges.}	H ⁺	Al ³⁺ /	V %
Braunerde- Podsol (VII/D)	Of	3- 5.5	22.91	2.43	0.62	0.92	0.22	0.63	10.68	8.05	9.93	13.5
	Oh	5.5- 0	20.55	1.11	0.39	0.50	0.55	0.52	15.31	7.87	9.60	12.4
	Aeh1	- 6	8.40	0.16	0.12	0.13	0.20	0.17	6.43	1.85	5.76	7.3
	Aeh2	-23	6.74	0.01	0.06	0.08	0.23	0.06	5.19	1.39	4.83	6.7
	Bvs	-31	6.86	0.09	0.04	0.04	0.10	0.21	5.59	1.15	5.24	3.9
	Bsv	-37	5.5	0.10	0.03	0.05	0.15	0.12	4.91	-	5.09	5.9
	II8v	-53	2.9	0.05	0.01	0.04	0.12	0.02	2.33	-	2.70	7.5
	Cv8v	-85	2.5	0.05	0.01	0.06	0.08	-	1.85	-	2.82	7.8
Podsol- Braunerde (VII/E)	Of	6.5- 2	20.73	0.93	0.47	0.75	0.13	0.75	13.81	6.92	10.71	11.0
	Oh	- 0	28.35	1.08	0.53	0.59	0.25	1.10	20.69	8.50	16.32	8.7
	Aeh	-11	7.86	0.11	0.10	0.10	0.17	0.17	5.56	1.69	5.33	6.0
	Bsv	-23	6.3	0.06	0.05	0.04	0.17	0.08	5.17	1.81	4.69	5.1
	Bv	-34	4.49	0.03	0.03	0.05	0.26	-	3.17	-	4.12	8.3
	IIcv8v	-48	3.18	-	0.01	0.06	0.21	-	1.88	-	2.90	8.6
	8vCv	-80	3.14	-	0.02	0.04	0.16	-	2.52	-	2.92	7.0
Braunerde- Podsol (VII/F)	Of	10- 5	24.49	1.10	0.43	1.0	0.20	1.58	16.58	6.923	13.21	11.2
	Oh	5- 0	29.25	0.81	0.61	0.76	0.31	2.65	21.69	6.30	17.80	8.5
	Aeh	- 5	8.49	0.09	0.10	0.14	0.21	0.13	6.96	1.84	5.93	7.0
	Aeh8vs	-13	8.12	0.08	0.10	0.08	0.18	0.08	6.39	1.63	5.97	5.4
	Bvs	-21	7.7	0.08	0.12	0.06	0.26	0.04	6.61	1.35	5.79	6.6
	8(s)v	-30	4.63	n.b.	0.03	0.04	0.13	-	3.91	-	4.43	4.4
	Bv	-40	3.16	0.01	0.03	0.04	0.24	-	1.81	-	2.85	10.1
	IIcv8v1	-64	2.08	0.02	0.01	0.05	0.17	-	1.18	-	1.83	12.0
	Cv8v2	-85	2.07	0.02	0.01	0.05	0.12	-	1.50	-	1.88	9.5

Tab.A.21.: Kationen-Austauschigenschaften in Pedons am Standort Enzianfilz (Paragneis).
Übrige Bodenformen sind in Tab.3.9. dargestellt.

Tab. A 22: Schwermetall-Gesamtgehalte in Leit-Pedons am Standort Enzianfilz

Standort: Enzianfilz (Paragneis)

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	Cd /	Pb	Cu $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Zn	Co	Ni	Cr /
Gley- Podsol (VII/A)	Of	25-20	2.0	310	21	98	-	8	17
	Oh	20- 0	1.4	139	11	52	-	3	10
	Aeh	-10	0.1	40	13	35	-	17	47
	Bsh	-14	0.05	25	19	78	-	27	71
	B(h)s	-21	0.04	23	25	98	-	31	71
	GoBvs	-29	0.01	27	39	108	-	37	77
	GoB(s)v	-35	0.05	24	32	110	-	38	75
	(Bv)Gr	-50	0.05	23	31	108	-	38	69
	IICvBv	-80	0.12	25	41	140	-	48	75
Eisen- humus- Podsol (VII/B)	Of	11- 5	0.6	186	23	64	1	6	12
	Oh	5- 0	1.2	245	23	52	1	6	16
	Ahe	- 9	0.2	40	12	18	1	3	39
	Bsh	-15	0.2	41	36	78	3	14	80
	Bhs	-19	0.2	28	51	105	5	23	98
	Bsv	-24	0.2	26	58	115	7	27	96
	Bv	-32	0.3	26	61	118	9	34	87
	IICvBv	-46	0.3	25	57	121	10	34	84
	GoBvCv	-90	0.2	24	61	129	11	33	84
maskierter Braunerde- Podsol (VII/C)	Of	9- 5.5	1.1	173	19	36	1	10	15
	Oh	5.5- 0	1.0	163	25	56	2	13	9
	Aeh	- 8	0.2	58	13	32	3	11	34
	Bvhs	-14	0.2	49	20	64	6	21	62
	Bvs	-19	0.1	28	31	93	9	33	78
	IIBv	-26	0.1	23	35	105	11	38	74
	CvBv	-56	0.1	26	29	92	10	29	71
	BvCv	-72	0.1	24	27	120	15	37	76
Braunerde- Podsol (VII/D)	Of	8- 5.5	0.8	270	19	61	1	7	11
	Oh	5.5- 0	0.9	271	20	47	1	6	10
	Aeh1	- 6	0.2	77	11	22	1	6	22
	Aeh2	-23	0.1	52	12	25	2	6	26
	Bvs	-31	0.1	38	23	76	6	23	58
	Bsv	-37	0.1	30	26	90	9	29	60
	IIB(s)v	-53	0.1	33	25	83	11	28	43
	CvBv	-85	0.2	36	42	105	16	34	65
Podsol- Braunerde (VII/E)	Of	6.5- 2	0.9	199	21	53	2	9	12
	Oh	2- 0	1.0	265	26	55	1	10	24
	Aeh	-11	0.2	61	13	32	2	10	34
	Bsv	-23	0.2	34	38	101	8	31	67
	Bv	-34	0.2	28	46	121	17	42	67
	IICvBv	-48	0.2	26	49	124	22	44	76
	BvCv	-80	0.2	30	50	128	27	49	78
Braunerde- Podsol (VII/F)	Of	10- 5	0.8	192	29	66	2	7	19
	Oh	5- 0	1.1	146	37	63	2	6	20
	Aeh	- 5	0.2	64	13	33	2	6	31
	AehBvs	-13	0.2	49	12	40	3	8	37
	Bvs	-21	0.1	35	26	81	6	22	59
	B(s)v	-30	0.1	23	27	95	11	32	67
	Bv	-40	0.1	20	29	59	13	35	68
	IICvBv1	-64	0.1	21	35	111	19	41	86
	CvBv2	-85	0.1	21	37	109	18	40	75

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	H ₂ O	pH	CaCl ₂	Na ⁺ /	K ⁺	Ca ²⁺ mg/g	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺ /
Podsol- Braunerde (I/B)	010f	7- 4	4.00	3.13		2.4	3.5	5.21	1.00	6.91	14.98
	Oh	4- 0	4.00	2.88		1.8	3.0	3.39	0.65	6.04	13.83
	Aeh	0- 4	4.28	3.65		13.0	18.0	4.60	3.90	30.37	68.75
	AhBsv	4-16	4.45	4.10		12.5	17.5	4.54	4.52	44.73	70.28
	Bsv	16-36	4.65	4.45		12.2	20.0	3.94	10.30	53.32	90.02
	IICvBv	36-60	4.75	4.63		14.5	25.5	4.26	12.16	45.72	56.54
	IIICv	60-105	4.80	4.73		14.5	26.0	4.30	12.11	44.09	62.47
Eisen- Humus- Podsol (I/A)	010f	2- 1	4.60	3.05		1.9	2.0	3.24	1.15	5.76	13.75
	Oh	1- 0	4.25	2.85		3.6	8.5	1.43	0.74	6.07	19.26
	Aeh	0- 3	4.13	3.25		8.0	26.2	1.84	1.13	7.18	45.17
	Ae	3- 9	4.10	3.45		9.8	31.7	1.03	0.75	5.20	41.67
	Bsh	9-22	4.33	3.75		11.8	26.5	2.45	2.40	20.01	51.48
	Bhs	22-31	4.70	4.25		16.1	29.5	2.64	5.35	28.84	59.86
	Bsv	31-49	4.70	4.55		22.1	32.2	2.69	6.93	26.49	76.17
	IICvBv	49-70	4.88	4.65		21.5	32.2	2.80	6.69	25.47	70.43
	BvCv	70-93	4.85	4.65		22.2	33.7	3.27	7.01	26.04	71.16

Tab.A.23: Bodenchemische Kenndaten der mineralogisch und verwitterungskinetisch untersuchten Pedons am Standort Lackenberg (I; Glimmerschiefer/Paragneis; vgl. FÖRSTER 1988).

Bodentyp (Profil)	Horizont	Tiefe cm	H ₂ O	pH	NaCl ₂	Na _t /	K _t	Ca _t mg/g	Mg _t	Fe _t	Al _t /
Podsol- Braunerde (IV/D)	010f	12- 5	3.32	2.88		3.0	1.0	1.86	0.42	3.32	3.91
	Oh	5- 0	3.16	2.74		5.2	3.0	1.35	0.41	3.80	11.69
	A(e)h	0- 6	3.90	3.68		13.5	19.5	3.12	0.92	13.10	36.69
	BshAh	-15	4.10	3.86		17.5	24.0	4.13	1.94	16.28	40.43
	Bvhs	-24	4.21	4.00		18.0	27.0	4.31	2.66	21.61	55.49
	SwBhsv	-53	4.25	4.08		19.7	25.5	5.44	4.72	25.99	45.41
	IIISdCvBv	-82	4.40	4.25		21.2	28.2	6.62	6.25	23.08	48.07
Eisen- Humus- Podsol (IV/B)	010f	10- 4	3.43	2.77		1.00	1.00	2.12	0.41	3.53	6.61
	Oh	4- 0	3.15	2.65		3.5	3.0	2.24	0.45	3.67	9.66
	Ae	0- 5	3.55	3.10		15.0	41.5	5.07	0.63	3.52	44.09
	AehBhs	5-10	3.76	3.14		17.8	35.5	5.45	1.36	11.65	46.00
	Bsh	10-20	3.72	3.40		16.8	26.8	4.42	2.87	19.21	55.12
	Bhs	20-29	4.41	4.23		20.0	20.0	6.99	3.97	34.45	65.37
	IIISwCvBvs	29-39	4.54	4.33		21.8	24.8	7.25	6.66	26.31	67.42
	CvSwBvs	39-63	4.57	4.26		20.5	27.0	5.94	4.21	17.5	67.97
	SwCvBsv	63-80	4.44	4.30		25.3	26.5	6.70	4.26	19.02	44.05
	IIISdCvBv	80-95	4.51	4.45		20.5	25.5	7.23	8.47	30.56	61.87

1006-

Tab.A.24: Bodenchemische Kenndaten der mineralogisch und verwitterungskinetisch untersuchten Pedons am Standort Lusen (IV; Granit; vgl. FÖRSTER 1988).

Mg²⁺-Behandlung



Aeh = 1

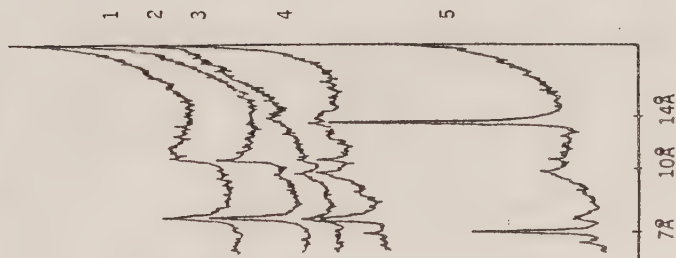
Bsv = 2

Bvs = 3

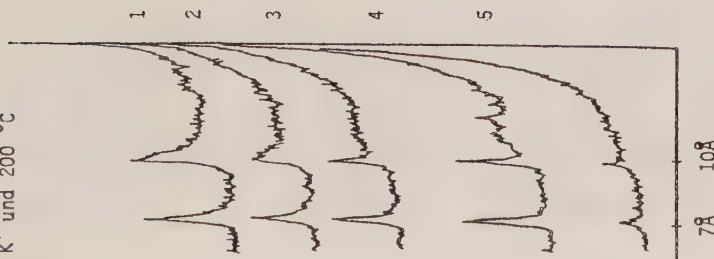
SwBsv = 4

IICvBsv = 5

K⁺-Behandlung



K⁺ und 200 °C



K⁺ und 560 °C

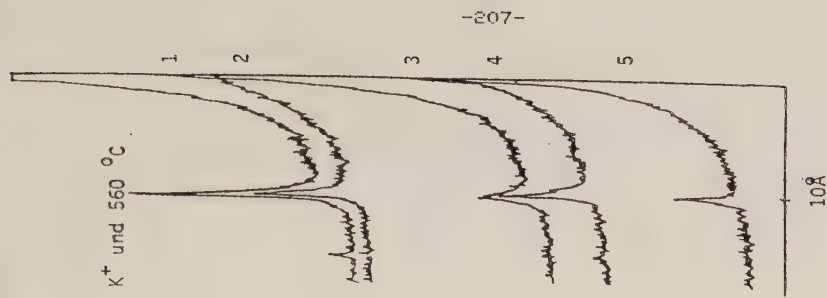


Abb.A.1.: Röntgenspektren der Tonfraktion in der Podsol-Braunerde (IV/D) am Standort Lusen.

Mg²⁺-Behandlung

K⁺ Beh.

K⁺ und 560 °C

K⁺ und 200 °C

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

2

3

4

5

6

7

8

1

Mg²⁺-Behandl.

K⁺-Behandlung

K⁺ und 560 °

K⁺ und 200 °C

Aeh =1
Ae =2
Bsh =3
Bhs =4
Bvs =5
IICvBv=6
BvCv=7

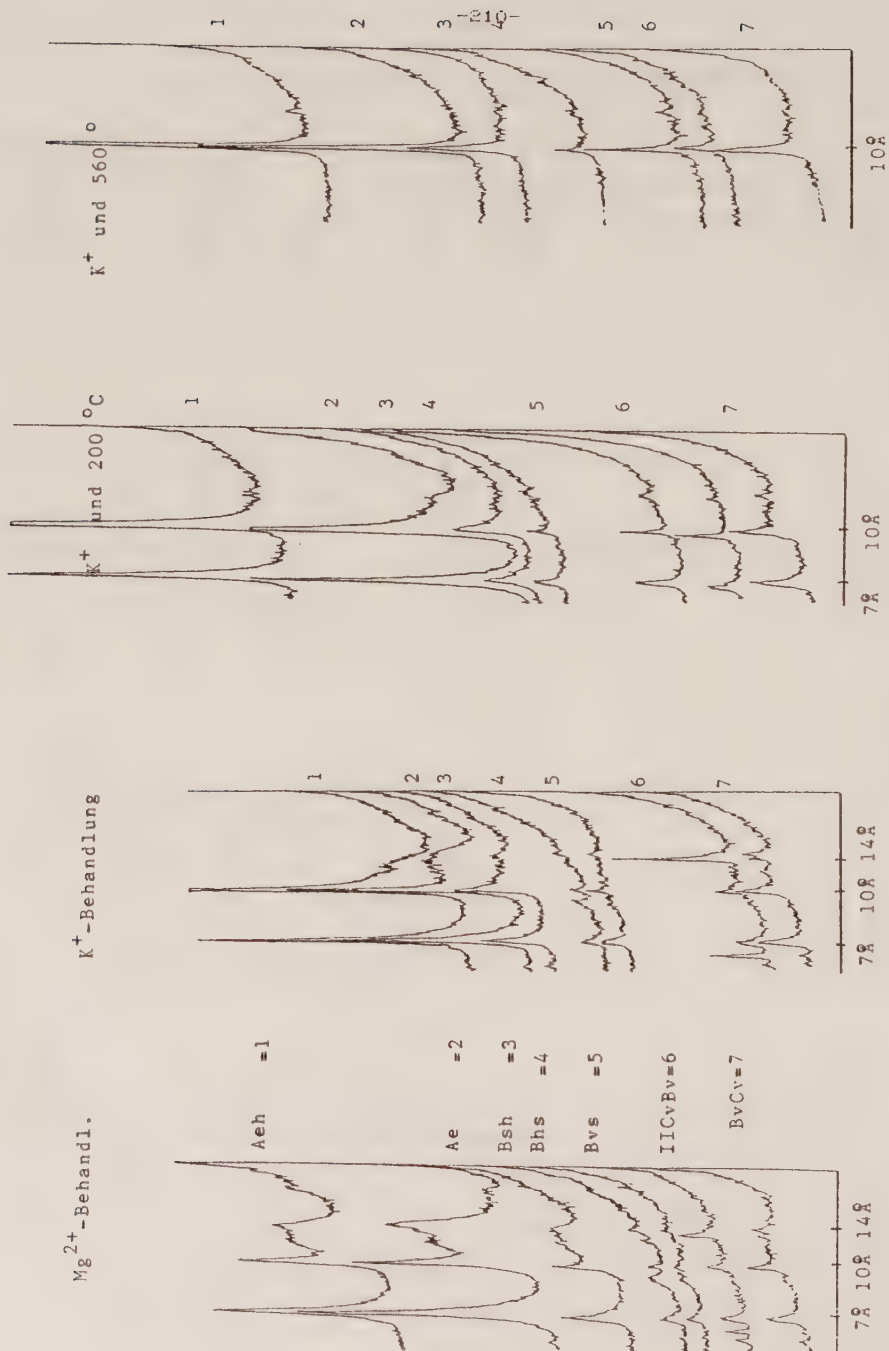


Abb.A.4.: Röntgenspektren der Tonfraktion des Podsoles (I/A) am Standort Lackenberg.

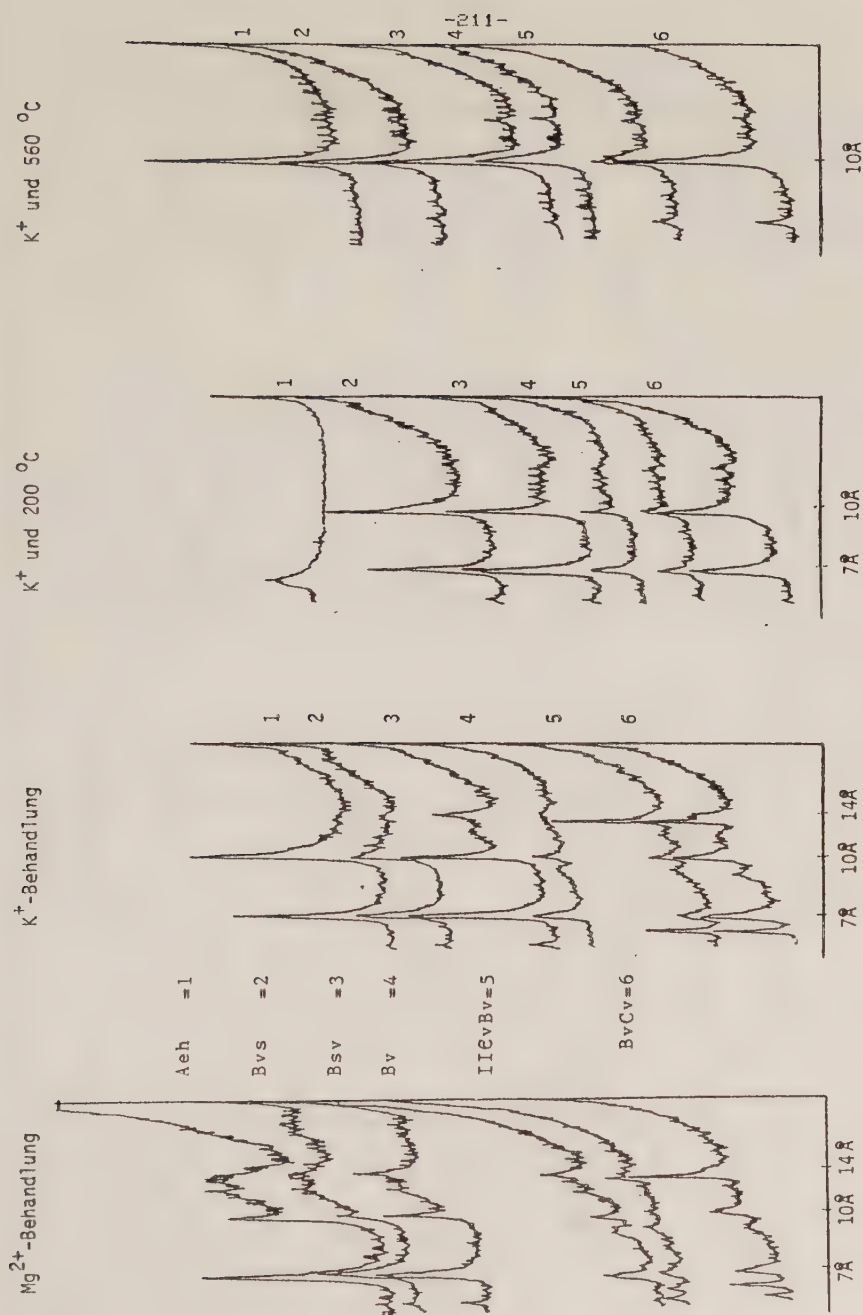


Abb.A.5.: Röntgenspektren der Tonfraktion des Braunerde-Podsols (III/C) am Standort Rachel.

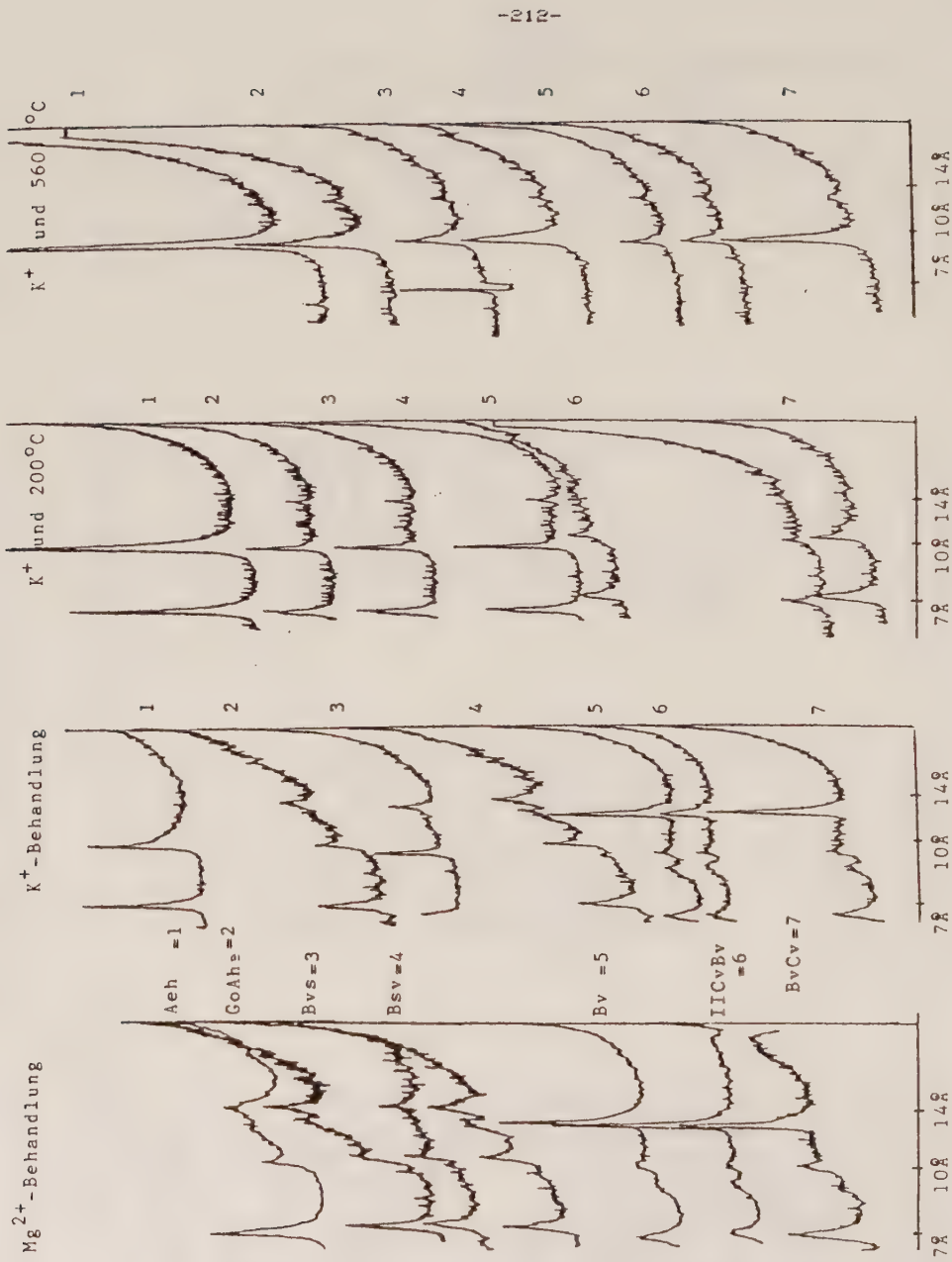


Abb.A.6.: Röntgenspektren der Tonfraktion des Hangley-Podsols (III/A) am Standort Rachel.

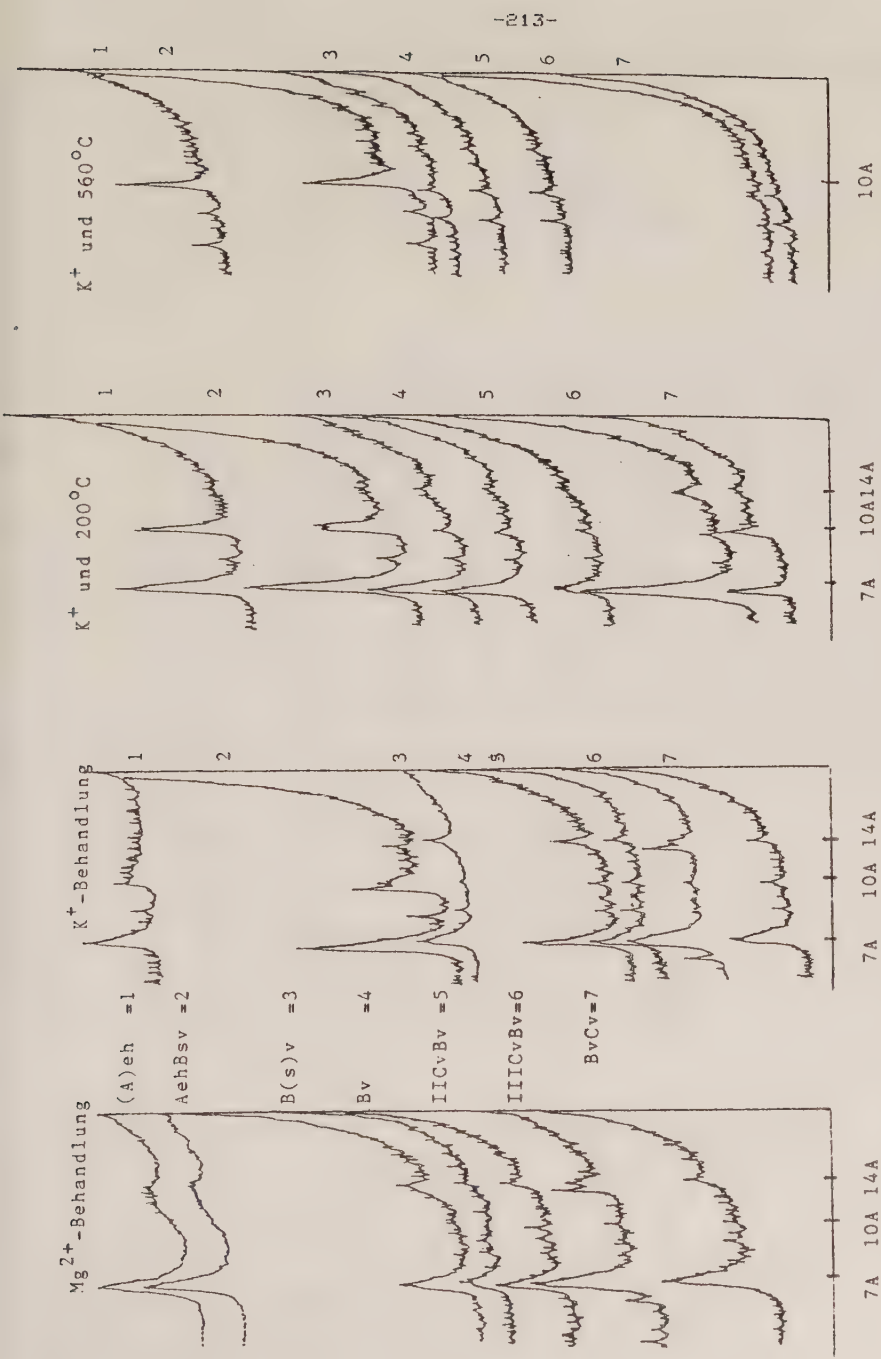


Abb.A.7.: Röntgenspektren der Tonfraktion der podsoligen Braunerde (V/D) am Standort Hoher Bogen.

Mg²⁺-Behandlung

K⁺-Behandlung

K⁺ und 200 °C

K⁺ und 560 °C

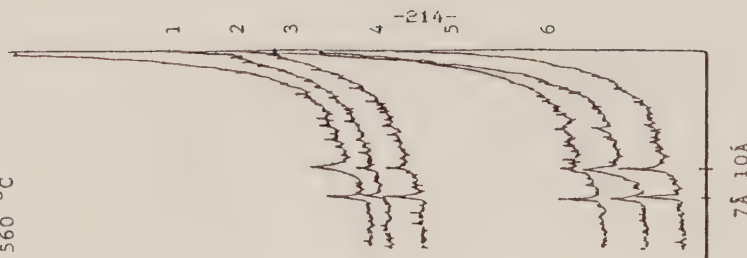
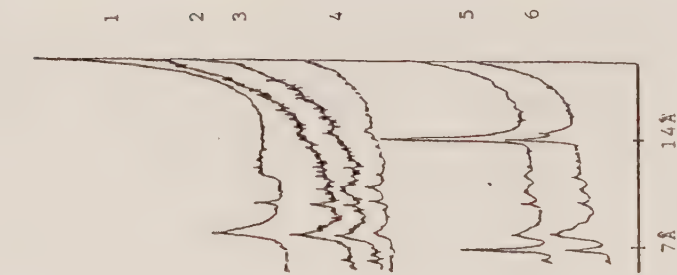
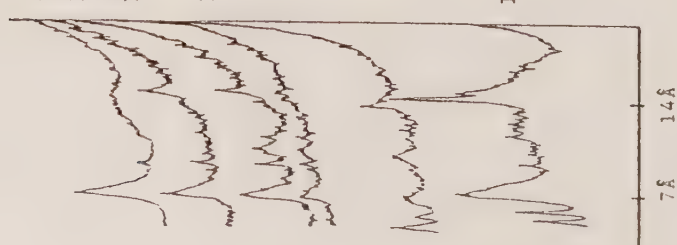


Abb.A.8.: Röntgenspektren der Tonfraktion der Podsol-Braunerde (V/C) am Standort Hoher Bogen.

Ergebnisse des Batch-Versuches ohne Vorbehandlung der Proben mit BaCl₂

- (a) = Extraktion mit aqua dest.
 b) = 10⁻⁴ M-HNO₃-Extraktion
 c) = 10⁻⁴ M-Zitronensäure-Extraktion)

Standort: Lackenberg (Glimmerschiefer); Profil B ≙ Podsol-Braunerde

Horizont: Aeh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.07	5.8	1.95	1.24	1.65	10.42	6.3	0.486
20	4.11	5.75	2.53	1.02	1.53	8.22	6.2	0.933
30	4.1	8.71	6.32	0.03	0.76	6.34	5.3	1.361
40	4.19	16.48	17.07	0.06	0.95	4.37	6.0	2.232
50	4.17	9.39	8.58	0.12	1.01	4.26	4.9	1.38
60	4.3	9.74	8.72	0.1	1.03	3.19	4.1	1.308
70	4.25	5.51	4.91	0.66	0.87	5.89	6.1	1.340
80	4.37	11.21	9.68	0.04	0.84	2.37	4.9	1.377

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.07	2.92	1.72	0.43	1.71	11.01	6.1	0.45
20	4.11	5.74	2.64	0.25	1.38	7.57	5.5	0.62
30	4.08	5.97	3.44	0.07	0.92	6.24	5.0	0.757
40	4.14	13.43	13.12	0.13	0.91	4.4	5.5	1.787
50	4.13	10.67	10.25	0.09	1.08	4.49	4.8	1.539
60	4.2	7.93	6.6	0.1	0.99	2.76	3.9	1.034
70	4.26	5.07	3.68	0.13	0.74	3.35	4.9	0.663
80	4.23	11.62	11.78	0.04	0.93	4.58	1.97	1.586

c) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.08	4.96	1.73	0.14	1.66	10.57	6.1	0.472
20	4.05	6.53	3.82	0.14	1.2	7.06	5.6	0.79
30	4.13	9.92	7.62	0.06	0.8	6.16	5.9	1.169
40	4.2	10.14	9.24	0.1	0.83	5.11	7.0	1.405
50	4.2	11.8	11.46	0.09	1.04	3.84	5.1	1.67
60	4.22	6.87	5.49	0.08	0.84	3.14	3.9	0.966
70	4.23	11.65	11.28	0.04	0.88	2.83	4.5	1.405
80	4.44	11.72	11.89	0.04	0.86	4.28	2.09	1.462

Tab.A.25.: Ergebnisse des Batch-Vorversuches.

Horizont: AhBsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.25	2.89	0.12	0.92	1.47	9.67	4.6	0.082
20	4.3	1.62	0.14	0.7	1.1	5.7	4.4	0.1
30	4.39	1.64	0.26	0.27	0.68	4.69	3.5	0.115
40	4.44	1.55	0.93	0.49	0.54	2.66	2.4	0.169
50	4.48	1.62	1.37	0.33	0.5	2.4	2.3	0.21
60	4.46	1.72	1.53	0.29	0.46	2.15	1.9	0.213
70	4.49	0.77	0.35	0.21	0.35	1.67	2.3	0.113
80	4.57	1.74	1.98	0.24	0.35	0.93	1.9	0.237
b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.22	2.17	0.13	1.65	1.67	9.76	5.4	0.124
20	4.37	1.65	0.07	0.84	1.08	5.45	3.3	0.081
30	4.3	1.55	0.12	0.34	0.8	4.59	3.0	0.094
40	4.4	1.33	0.17	0.71	0.62	2.57	2.1	0.12
50	4.44	1.27	0.42	0.46	0.56	2.46	2.5	0.12
60	4.41	1.44	0.48	0.44	0.55	1.65	1.9	0.116
70	4.45	0.62	0.15	0.33	0.42	1.31	2.5	0.153
80	4.45	1.05	0.22	0.4	0.39	1.68	0.78	0.091
c) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.32	1.48	0.06	0.93	1.41	10.49	5.9	0.112
20	4.38	1.77	0.13	0.65	0.96	6.16	3.4	0.094
30	4.33	1.5	0.24	0.25	0.68	5.23	3.2	0.113
40	4.4	2.27	1.8	0.43	0.5	2.9	2.5	0.263
50	4.46	1.4	0.72	0.31	0.46	2.43	1.9	0.155
60	4.54	1.87	1.71	0.22	0.44	2.17	2.0	0.236
70	4.42	1.07	0.44	0.16	0.31	1.46	2.1	0.13
80	4.59	1.78	1.57	0.16	0.32	1.88	0.9	0.22

Fortsetzung Tab. A. 25.:

Horizont: Bsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.5	0.85	/	0.34	0.73	8.69	2.4	0.044
20	4.52	0.97	0.06	0.64	0.8	5.72	1.5	0.052
30	4.54	0.8	0.01	0.16	0.47	4.64	1.2	0.05
40	4.65	1.16	0.61	0.33	0.45	3.05	1.3	0.124
50	4.59	0.69	/	0.36	0.38	2.53	1.2	0.033
60	4.55	0.75	/	0.34	0.35	1.47	0.6	0.03
70	4.64	0.69	0.1	0.2	0.31	1.47	2.2	0.052
80	4.74	0.44	0.02	0.36	0.24	0.73	1.6	0.027
b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.52	0.43	/	0.57	0.87	8.73	3.10	0.047
20	4.57	0.9	/	0.52	0.77	5.89	1.5	0.034
30	4.53	0.97	/	0.16	0.49	4.72	2.0	0.033
40	4.6	1.16	/	0.48	0.45	2.95	1.5	0.05
50	4.56	0.95	/	0.37	0.42	2.43	1.5	0.033
60	4.45	1.08	0.01	0.37	0.4	1.61	1.0	0.028
70	4.54	0.8	/	0.35	0.3	1.37	1.4	0.027
80	4.57	1.06	0.16	0.32	0.27	1.28	0.84	0.055
c) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	Na /	K /	nm
10	4.61	0.38	0.08	0.44	0.83	9.31	3.2	0.046
20	4.55	0.87	0.05	0.27	0.97	6.24	1.5	0.054
30	4.58	1.11	0.06	0.15	0.45	5.23	1.5	0.051
40	4.6	1.06	0.05	0.42	0.43	3.29	1.3	0.08
50	4.57	0.93	0.03	0.36	0.41	2.97	3.3	0.043
60	4.59	0.77	0.01	0.26	0.34	1.67	0.7	0.034
70	4.62	0.52	0.01	0.23	0.32	1.75	1.9	0.042
80	4.74	0.7	/	0.26	0.24	1.98	0.95	0.03

Fortsetzung Tab.A.25.:

Tab. A. 26.:

Ergebnisse von Batch-Versuchen mit Ba-belegten Böden

(a) = 10^{-4} M-HNO₃-Extraktion
 (b) = 10^{-4} M-Zitronensäure-Extraktion)

Standort: Lackenberg (Glimmerschiefer); Profil: B $\hat{=}$ Podsol-Braunerde;

Horizont: Aeh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.63	71.3	52.4	1.2	0.63	28.3	8.41	0.335
20	3.66	23.22	35.18	1.1	0.44	18.8	6.03	0.287
30	3.81	13.43	21.42	0.5	0.3	11.9	3.71	0.13
40	3.85	5.32	9.87	0.37	0.21	7.4	2.86	0.105
50	3.99	2.24	4.72	0.26	0.15	3.8	1.51	0.107
60	4.12	1.24	2.63	0.07	0.13	1.9	0.84	0.112
70	4.23	0.4	1.41	0.07	0.09	1.5	1.84	0.153
80	4.42	0.67	0.92	0.1	0.1	0.6	0.19	0.167

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	3.62	74.4	57.2	1.3	0.56	30.9	9.42	0.295
20	3.71	22.54	39.19	1.13	0.31	19.4	5.89	0.198
30	3.7	12.49	17.18	0.28	0.2	10.2	2.75	0.14
40	3.87	7.06	10.11	0.34	0.21	6.8	2.74	0.121
50	4.03	2.65	5.17	0.22	0.16	5.1	2.23	0.123
60	4.09	1.3	2.69	0.06	0.11	2.1	1.46	0.114
70	4.24	0.69	1.42	0.36	0.18	2.1	1.21	0.128
80	4.3	1.98	1.1	/	0.11	0.9	0.28	0.486

Horizont: AhBsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.00	82.1	6.29	1.06	0.56	29.9	8.44	0.15
20	4.11	29.42	4.48	0.69	0.36	19.1	5.66	0.097
30	4.11	16.83	2.73	0.26	0.22	11.8	3.47	0.063
40	4.21	7.84	1.35	0.26	0.17	7.5	2.61	0.044
50	4.37	3.51	0.68	0.23	0.14	4.2	1.64	0.044
60	4.42	1.27	0.48	0.11	0.1	3.1	0.88	0.044
70	4.58	0.57	0.22	0.06	0.06	1.4	0.75	0.041
80	4.74	0.35	0.09	0.03	0.05	0.9	0.06	0.044

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	3.97	97.3	6.14	0.98	0.61	34.1	9.55	0.19
20	4.1	32.25	5.5	0.99	0.39	20.9	6.37	0.102
30	4.02	19.38	2.69	0.23	0.22	12.1	3.4	0.069
40	4.26	10.5	1.34	0.27	0.2	8.2	2.65	0.051
50	4.34	4.07	0.82	0.15	0.13	4.9	1.59	0.046
60	4.39	1.65	0.56	0.1	0.08	2.7	0.79	0.044
70	4.58	0.78	0.21	/	0.06	1.4	0.22	0.065
80	4.67	0.22	0.13	/	0.05	0.46	1.0	0.31

Fortsetzung Tab.A.26.:

Horizont: Bsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.25	67.4	2.06	0.47	0.26	27.2	8.47	0.109
20	4.28	25.9	1.54	0.39	0.18	16.7	5.43	0.055
30	4.31	14.36	0.79	0.08	0.11	8.6	2.6	0.03
40	4.39	8.48	0.41	0.21	0.14	6.0	2.3	0.024
50	4.46	4.13	0.18	0.19	0.13	3.3	1.39	0.02
60	4.53	1.88	0.17	0.05	0.12	2.1	2.22	0.028
70	4.63	0.68	0.06	0.06	0.06	1.4	0.6	0.02
80	4.68	0.51	0.03	0.02	0.07	0.7	0.01	0.013

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	4.25	67.8	1.91	0.43	0.23	27.1	8.46	0.109
20	4.33	23.61	1.57	0.52	0.18	16.2	5.26	0.056
30	4.26	15.73	0.62	0.07	0.12	8.4	2.69	0.035
40	4.43	9.03	0.26	0.16	0.14	5.1	2.16	0.023
50	4.5	3.87	0.17	0.09	0.1	4.6	1.24	0.02
60	4.52	1.84	0.08	0.11	0.09	2.3	1.06	0.021
70	4.69	0.8	0.04	/	0.07	0.6	1.33	0.028
80	4.6	0.26	/	/	0.07	0.8	0.32	0.016

Standort: Lackenberg (Glimmerschiefer); Profil A ≈ Podsol

Horizont: Ae

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.68	5.6	13.2	0.24	0.09	19.2	5.9	0.162
20	3.82	0.75	6.66	0.12	0.06	9.1	3.04	0.118
30	4.0	0.49	2.48	0.16	0.11	6.3	2.79	0.021
40	4.14	0.08	1.22	0.04	0.03	2.3	0.98	0.084
50	4.33	0.09	0.58	0.09	0.03	1.0	0.46	0.115
60	4.46	0.16	0.48	0.03	0.01	0.9	0.7	0.176
70	4.61	1.81	1.16	0.06	0.07	0.7	0.34	0.36
80	4.8	2.62	1.62	0.01	0.12	0.9	0.05	0.452

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	3.68	6.6	13.6	0.24	0.1	19.1	6.06	0.168
20	3.81	/	8.38	0.24	0.06	9.3	3.08	0.113
30	3.96	0.1	3.23	/	0.1	3.4	0.85	0.086
40	4.12	/	1.47	0.08	0.05	1.8	0.77	0.109
50	4.29	0.19	1.04	0.06	0.04	1.7	1.02	0.161
60	4.47	0.39	1.5	/	0.01	1.5	0.83	0.258
70	4.55	3.46	3.54	/	0.1	0.5	0.69	0.613
80	4.69	4.7	5.57	/	0.18	1.4	0.53	0.749

Fortsetzung Tab. A. 26.:

Horizont: Bsh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.83	119.1	55.5	0.36	0.21	26.1	7.89	0.365
20	3.93	28.43	27.11	0.32	0.13	15.8	5.12	0.202
30	4.09	13.3	15.79	0.38	0.08	8.8	2.79	0.11
40	4.15	4.81	6.38	0.12	0.06	5.2	2.08	0.101
50	4.29	1.94	2.85	0.09	0.05	3.6	1.14	0.11
60	4.42	0.86	1.56	0.02	0.04	1.9	1.66	0.126
70	4.57	0.56	0.76	0.01	0.02	1.0	0.46	0.156
80	4.67	0.66	0.64	/	0.03	0.6	0.2	0.226

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	3.84	109.3	55.8	0.51	0.21	26.4	8.17	0.316
20	3.99	24.9	30.33	0.56	0.13	14.9	4.84	0.173
30	3.98	12.71	12.48	0.14	0.07	7.9	2.41	0.211
40	4.22	5.68	6.48	0.32	0.13	5.0	2.14	0.109
50	4.39	2.15	2.82	0.11	0.07	3.1	1.23	0.112
60	4.42	0.97	1.34	0.01	0.03	1.5	1.24	0.122
70	4.59	0.66	0.75	/	0.02	0.7	/	0.161
80	4.69	0.86	0.57	/	0.03	0.6	0.3	0.237

Horizont: Bvs

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.5	15.2	1.04	0.1	0.11	16.0	5.14	0.056
20	4.57	3.97	0.59	0.08	0.1	7.1	2.52	0.025
30	4.73	0.34	/	0.07	0.05	2.4	0.61	0.02
40	4.88	0.01	/	0.05	0.06	1.0	0.4	0.016
50	5.01	0.17	/	0.03	0.05	0.6	0.46	0.023
60	5.29	0.17	/	/	0.03	1.1	0.53	0.039
70	5.39	1.06	0.54	/	0.04	0.2	0.28	0.152
80	5.53	4.93	2.4	/	0.17	0.2	/	0.354

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	4.52	14.6	0.69	0.43	0.14	14.9	5.12	0.052
20	4.62	1.22	0.56	0.22	0.09	6.4	2.16	0.029
30	4.74	0.87	0.17	0.10	0.04	1.9	0.48	0.018
40	4.94	0.08	/	0.04	0.06	1.0	0.79	0.02
50	5.14	0.2	/	0.03	0.06	0.08	0.41	0.03
60	5.34	0.46	0.06	/	0.02	0.3	0.12	0.056
70	5.42	7.37	3.12	/	0.19	/	/	0.568
80	5.52	13.78	5.36	/	0.42	0.9	0.22	0.798

Fortsetzung Tab.A.26.:

Standort: Rachel (Gneis); Profil A $\hat{=}$ Hanggley-Podsol

Horizont: GoAhe

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.94	36.4	12.6	0.23	0.42	23.1	7.48	0.114
20	4.07	7.68	7.14	0.17	0.31	12.5	3.93	0.093
30	4.23	2.67	3.26	0.01	0.24	5.9	1.53	0.048
40	4.3	1.12	1.48	0.12	0.19	3.7	1.9	0.039
50	4.56	0.4	0.66	0.07	0.15	2.1	0.62	0.048
60	4.6	0.28	0.53	0.02	0.09	1.2	1.37	0.065
70	4.73	0.34	0.52	0.03	0.08	0.6	1.29	0.118
80	4.9	1.63	2.9	0.01	0.15	0.6	0.01	0.302

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	4.0	32.3	11.2	0.29	0.39	21.6	6.94	0.118
20	4.15	5.28	6.95	0.23	0.29	10.7	3.37	0.057
30	4.17	2.3	2.8	/	0.2	5.1	1.36	0.041
40	4.4	0.71	1.06	0.07	0.17	2.7	0.96	0.048
50	4.62	0.23	0.52	0.08	0.13	4.1	0.78	0.054
60	4.87	0.43	0.4	0.02	0.07	0.9	1.0	0.087
70	4.78	1.02	1.23	/	0.08	0.1	0.48	0.212
80	4.93	7.55	11.44	/	0.58	1.6	0.31	0.978

Horizont: Bsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.34	20.7	1.39	0.21	0.29	16.8	5.96	0.052
20	4.45	3.41	0.93	0.22	0.17	7.3	2.68	0.028
30	4.57	1.43	0.02	/	0.1	3.0	0.67	0.02
40	4.75	0.36	0.11	0.03	0.09	1.6	0.66	0.019
50	4.95	0.09	/	0.05	0.06	0.7	0.51	0.029
60	5.08	0.24	0.18	0.02	0.04	0.6	0.36	0.048
70	5.21	1.11	0.88	0.01	0.08	0.3	0.12	0.143
80	5.3	4.88	4.03	/	0.25	0.5	/	0.418

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	4.37	18.9	1.17	0.24	0.2	15.9	5.42	0.048
20	4.52	1.85	0.44	0.21	0.15	6.5	2.46	0.025
30	4.52	0.88	0.32	/	0.09	2.4	0.76	0.024
40	4.81	0.5	/	0.04	0.07	0.9	0.54	0.023
50	4.99	0.18	0.15	0.05	0.06	0.9	0.5	0.036
60	5.07	0.49	0.06	0.02	0.04	0.4	0.84	0.064
70	5.27	1.74	0.94	/	0.05	/	/	0.174
80	5.37	21.49	16.46	/	1.07	2.2	0.28	1.458

Fortsetzung Tab.A. 26.:

Horizont: Bv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.54	12.4	0.64	0.1	0.16	13.6	4.5	0.03
20	4.56	1.71	0.57	0.05	0.11	5.8	2.04	0.015
30	4.65	1.21	/	0.06	0.08	2.6	0.6	0.014
40	4.83	0.27	0.03	0.07	0.08	1.4	0.44	0.009
50	4.98	0.1	0.01	0.08	0.07	0.7	0.61	0.015
60	5.06	0.19	0.15	0.04	0.04	0.4	1.09	0.025
70	5.23	0.25	0.02	0.02	0.03	0.2	0.3	0.032
80	5.42	1.4	0.71	0.01	0.07	0.5	/	0.115

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	4.53	12.9	0.67	0.17	0.17	13.6	4.64	0.034
20	4.64	1.38	0.16	0.12	0.11	5.1	1.87	0.013
30	4.64	0.93	0.21	0.07	0.06	1.7	0.26	0.013
40	4.84	0.35	/	0.02	0.06	0.6	0.32	0.012
50	5.06	0.06	/	0.03	0.06	1.0	0.57	0.017
60	5.11	0.31	/	/	0.03	0.5	/	0.028
70	5.27	1.02	0.17	/	0.02	/	/	0.077
80	5.43	14.53	7.2	/	0.48	1.2	0.17	0.732

Standort: Rachel (Gneis); Profil C ≈ Braunerde-Podsol

Horizont: Ahe

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.74	97.0	16.6	1.11	1.01	37.1	10.06	0.303
20	3.78	35.76	11.71	1.15	0.7	27.3	7.52	0.242
30	3.88	29.19	8.01	0.46	0.49	19.2	5.37	0.157
40	3.94	18.04	3.67	0.41	0.33	13.7	3.96	0.119
50	4.05	8.91	2.33	0.42	0.25	9.3	2.92	0.117
60	4.05	3.68	1.61	0.2	0.17	6.2	3.02	0.117
70	4.21	2.28	0.94	0.12	0.14	3.9	2.81	0.099
80	4.32	1.66	0.74	0.1	0.12	2.6	0.64	0.126

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	3.75	88.2	17.2	1.13	0.9	35.6	9.63	0.314
20	3.77	34.77	12.52	1.43	0.7	26.4	7.23	0.233
30	3.82	24.01	6.48	0.39	0.42	17.7	4.75	0.151
40	3.99	17.05	3.62	0.37	0.34	48.7	3.5	0.125
50	4.06	8.77	2.16	0.37	0.24	9.0	3.09	0.122
60	4.08	3.69	1.49	0.23	0.16	5.7	1.82	0.097
70	4.2	2.14	0.82	0.02	0.1	4.0	0.77	0.097
80	4.27	1.28	0.59	0.02	0.1	2.5	0.85	0.112

Fortsetzung Tab. A.26.:

Horizont: Bvs

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.81	65.8	13.3	0.56	0.55	29.5	35.75	0.2
20	3.99	20.58	8.48	0.49	0.32	17.7	5.62	0.118
30	4.05	11.21	4.16	0.13	0.21	10.3	2.98	0.069
40	4.17	5.33	2.16	0.21	0.21	6.5	2.21	0.055
50	4.29	2.12	1.12	0.19	0.14	3.8	1.42	0.053
60	4.38	0.85	0.75	0.34	0.16	2.7	1.51	0.051
70	4.47	0.29	0.3	0.09	0.09	1.2	1.21	0.065
80	4.63	0.36	0.23	0.04	0.07	0.9	0.32	0.073

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	nm
10	3.93	61.5	13.2	0.55	0.41	28.2	7.73	0.176
20	4.05	16.37	8.46	0.58	0.29	16.8	5.07	0.102
30	3.98	11.76	4.5	0.12	0.2	10.1	2.94	0.082
40	4.22	4.94	1.95	0.16	0.19	4.9	2.01	0.055
50	4.29	1.76	1.08	0.1	0.13	3.7	1.6	0.055
60	4.45	1.09	0.56	0.08	0.08	2.2	0.75	0.057
70	4.45	0.5	0.28	/	0.07	0.9	0.06	0.073
80	4.68	0.4	0.22	/	0.06	1.1	0.52	0.085

Horizont: Bsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.09	38.0	3.67	0.21	0.39	21.7	6.56	0.077
20	4.22	7.13	2.21	0.17	0.26	11.9	3.66	0.044
30	4.25	3.55	0.84	0.05	0.2	5.7	1.5	0.031
40	4.41	0.9	0.37	0.1	0.16	3.4	1.12	0.022
50	4.57	0.35	0.13	0.07	0.12	1.8	0.67	0.03
60	4.66	0.25	0.2	/	0.07	1.0	1.37	0.042
70	4.9	0.22	0.17	0.01	0.06	0.5	1.06	0.073
80	5.07	1.64	1.7	0.01	0.13	0.5	/	0.191

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	nm
10	4.07	37.0	3.22	0.33	0.42	22.5	6.53	0.065
20	4.2	5.47	1.98	0.32	0.27	11.8	3.74	0.041
30	4.31	3.8	1.0	0.04	0.19	5.8	1.5	0.033
40	4.42	0.83	0.32	0.09	0.16	2.3	0.78	0.026
50	4.7	0.31	0.13	0.07	0.11	2.1	1.05	0.03
60	4.8	0.3	0.1	/	0.08	1.0	0.9	0.04
70	4.85	0.56	0.09	/	0.05	0.5	0.81	0.086
80	5.02	3.41	3.66	/	0.23	0.9	0.21	0.354

Fortsetzung Tab.A.26.:

Standort: Lusen (Granit); Profil B $\hat{=}$ Humus-Eisen-Podsol

Horizont: Ae

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.6	1.6	1.99	0.21	0.11	19.6	5.49	0.065
20	3.73	/	1.73	0.15	0.1	12.3	3.2	0.067
30	3.89	0.72	0.7	0.02	0.1	5.7	1.25	0.066
40	4.01	0.1	0.17	0.09	0.12	3.2	1.07	0.074
50	4.21	/	0.13	0.1	0.12	1.8	0.74	0.101
60	4.35	0.08	0.08	0.07	0.09	1.4	1.5	0.141
70	4.55	4.8	1.27	0.23	0.1	5.5	2.44	0.172
80	4.8	1.81	0.33	0.02	0.12	0.9	0.11	0.4

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	3.58	1.9	2.14	0.35	0.13	20.8	5.67	0.084
20	3.73	/	0.79	0.4	0.1	10.2	3.15	0.066
30	3.81	0.29	0.47	0.05	0.07	4.2	0.94	0.076
40	4.02	0.35	0.15	0.12	0.11	2.3	0.87	0.084
50	4.23	0.37	0.2	0.06	0.11	2.0	1.15	0.122
60	4.35	0.53	0.43	/	0.07	1.7	0.98	0.202
70	4.49	3.16	0.86	/	0.12	0.6	/	0.46
80	4.64	0.83	0.99	/	0.08	1.2	0.53	0.178

Horizont: Bsh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.63	82.5	59.1	0.33	0.24	23.6	7.18	0.467
20	3.74	19.64	33.21	0.27	0.18	14.2	4.64	0.495
30	3.89	8.1	17.61	0.08	0.13	7.8	2.3	0.224
40	3.96	3.6	6.89	0.1	0.12	5.2	1.87	0.214
50	4.11	1.55	3.03	0.13	0.1	2.8	1.21	0.251
60	4.27	1.21	1.49	0.1	0.1	1.7	1.75	0.318
70	4.37	1.23	1.31	/	0.05	1.0	1.44	0.462
80	4.53	1.67	1.63	0.02	0.07	0.7	0.06	0.735

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	3.66	66.9	53.8	0.3	0.21	22.9	6.87	0.52
20	3.78	12.85	31.28	0.35	0.17	13.5	4.21	0.421
30	3.81	6.03	15.1	/	0.1	6.7	1.76	0.305
40	4.09	2.54	4.61	0.06	0.1	3.8	1.27	0.22
50	4.2	1.32	2.19	0.03	0.08	2.5	0.95	0.267
60	4.39	0.91	1.22	0.01	0.04	1.2	1.15	0.36
70	4.45	1.44	0.98	/	0.02	0.6	/	0.54
80	4.74	2.18	2.23	/	0.07	0.8	0.21	0.924

Horizont: Bs

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.25	55.6	23.3	0.33	0.14	22.4	8.84	0.229
20	4.34	15.94	13.9	0.21	0.07	14.3	5.01	0.144
30	4.41	6.82	8.29	0.07	0.05	6.8	2.35	0.079
40	4.78	0.81	1.02	0.13	0.07	1.8	0.62	0.052
50	5.1	0.22	0.35	0.07	0.03	0.6	0.17	0.076
60	5.25	0.8	0.59	/	0.02	0.2	0.91	0.174
70	5.37	1.0	0.7	/	0.03	/	0.05	0.235
80	5.43	1.18	0.9	0.02	0.04	0.1	/	0.248

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	nm
10	4.26	57.3	23.3	0.34	0.13	24.7	9.39	0.233
20	4.36	13.61	15.67	0.31	0.09	14.1	5.18	0.134
30	4.35	7.52	10.53	0.02	0.05	7.1	2.35	0.101
40	4.59	3.42	3.42	0.11	0.07	4.5	2.06	0.065
50	4.72	1.4	1.7	0.06	0.05	2.8	1.24	0.068
60	4.78	0.54	0.86	0.03	0.04	1.2	2.03	0.081
70	4.91	0.4	0.51	/	0.02	0.6	/	0.099
80	5.13	0.64	0.46	/	0.04	0.7	0.47	0.154

Standort: Lusen (Granit); Profil D ≙ Podsol-BraunerdeHorizont: Aeh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.6	152.0	16.2	1.47	0.5	36.0	12.47	0.6
20	3.21	59.62	13.5	1.54	0.38	28.8	10.28	0.45
30	3.78	43.03	5.83	0.61	0.32	20.6	8.04	0.215
40	3.81	30.72	4.06	0.62	0.22	16.6	6.11	0.246
50	3.9	16.18	2.6	0.46	0.18	11.3	3.99	0.204
60	4.01	8.76	1.74	0.25	0.12	7.7	2.89	0.179
70	4.0	1.45	0.3	0.01	0.1	0.9	1.35	0.328
80	4.16	2.85	0.71	0.25	0.08	3.5	1.18	0.18

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg µg/g	K /	Na /	nm
10	3.64	145.0	17.2	1.46	0.47	38.1	13.13	0.572
20	3.72	61.44	14.52	1.81	0.42	30.1	10.32	0.418
30	3.69	42.79	9.48	0.67	0.25	21.3	6.92	0.315
40	3.8	33.33	4.17	0.49	0.22	16.8	5.84	0.24
50	3.95	20.36	2.72	0.5	0.17	12.6	4.62	0.232
60	3.95	8.64	1.82	0.24	0.11	9.6	4.06	0.185
70	4.03	4.77	1.12	0.25	0.12	4.9	1.09	0.176
80	4.12	2.91	0.65	0.08	0.07	3.7	1.41	0.177

Horizont: Bsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.05	65.6	5.04	0.72	0.3	29.3	9.75	0.233
20	4.1	20.95	3.54	0.72	0.2	19.8	6.57	0.147
30	4.2	9.33	1.1	0.21	0.13	10.8	3.37	0.096
40	4.31	4.35	0.82	0.23	0.12	7.3	2.41	0.078
50	4.44	1.64	0.53	0.18	0.1	5.3	1.65	0.079
60	4.54	1.04	0.24	0.09	0.08	3.3	1.42	0.049
70	4.65	0.51	0.15	0.05	0.04	1.5	0.88	0.106
80	4.79	0.53	0.1	0.04	0.04	1.5	0.19	0.128

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	4.04	51.1	4.61	0.8	0.25	27.7	9.32	0.203
20	4.18	11.34	3.0	0.76	0.17	16.4	5.55	0.125
30	4.2	7.26	2.26	0.16	0.12	10.6	2.81	0.096
40	4.44	3.4	0.55	0.19	0.11	5.9	2.21	0.079
50	4.53	1.36	0.28	0.15	0.08	3.6	1.25	0.082
60	4.61	0.48	0.15	0.04	0.04	1.9	0.61	0.094
70	4.76	0.77	0.04	/	0.03	0.8	0.58	0.132
80	4.95	1.03	0.09	/	0.04	1.0	0.58	0.178

Horizont: SwBsv

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.22	42.9	2.47	0.51	0.22	26.7	11.12	0.156
20	4.29	10.99	1.75	0.37	0.13	15.6	6.48	0.096
30	4.44	3.11	0.32	0.12	0.09	8.4	3.08	0.068
40	4.57	1.44	0.26	0.15	0.11	5.3	1.98	0.06
50	4.74	0.6	0.13	0.31	0.1	3.0	1.03	0.068
60	4.85	0.35	0.03	/	0.04	2.6	1.19	0.025
70	4.98	0.4	0.02	0.01	0.04	1.0	1.36	0.138
80	5.19	0.88	0.51	0.01	0.05	0.9	0.02	0.234

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg μg/g	K /	Na /	nm
10	4.17	38.4	2.61	0.53	0.21	26.8	11.52	0.155
20	4.31	6.83	1.4	0.54	0.16	16.4	6.56	0.101
30	4.48	3.66	1.69	0.06	0.1	8.3	3.09	0.074
40	4.53	1.61	0.14	0.18	0.12	5.2	2.19	0.066
50	4.77	0.74	0.02	0.06	0.08	3.2	1.35	0.073
60	4.83	0.17	0.1	0.03	0.05	1.8	1.27	0.098
70	4.98	0.93	/	/	0.04	0.9	0.69	0.164
80	5.22	2.16	1.23	/	0.07	0.9	0.3	0.343

Fortsetzung Tab. A.26.:Standort: Hoher Bogen (Amphibolit); Profil C $\hat{=}$ Podsol-BraunerdeHorizont: Aeh

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	3.3	34.4	50.2	0.83	0.49	24.9	7.65	0.326
20	3.39	8.05	32.96	0.86	0.39	14.5	4.75	0.289
30	3.51	3.81	15.43	0.3	0.29	7.2	2.16	0.17
40	3.62	1.7	8.95	0.3	0.27	4.0	1.51	0.125
50	3.78	0.71	4.27	0.18	0.19	1.9	0.76	0.147
60	3.93	0.43	2.34	0.12	0.14	1.0	1.52	0.175
70	4.01	0.73	1.67	0.04	0.1	0.8	0.72	0.261
80	4.12	2.88	3.82	0.4	0.32	8.0	11.71	0.490

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	3.27	34.8	54.0	1.16	0.47	25.3	7.89	0.304
20	3.38	7.0	37.89	1.12	0.37	13.7	4.44	0.232
30	3.42	4.93	19.27	0.34	0.32	8.5	2.92	0.149
40	3.68	2.13	9.85	0.31	0.3	4.1	1.8	0.159
50	3.77	0.83	5.36	0.16	0.24	2.4	0.99	0.161
60	3.84	0.47	2.79	0.07	0.16	1.5	1.11	0.17
70	3.93	0.67	2.06	0.04	0.13	1.3	1.08	0.258
80	4.09	1.96	3.62	/	0.15	0.5	0.34	0.494

Horizont: B s v

a) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	Huminstoff- Extinktion nm
10	4.09	39.3	2.05	0.69	0.3	23.1	7.47	0.109
20	4.13	10.44	1.46	0.77	0.21	12.6	4.4	0.064
30	4.21	5.02	0.55	0.26	0.15	6.4	2.03	0.045
40	4.34	2.15	0.25	0.26	0.15	3.7	1.32	0.038
50	4.56	0.67	0.14	0.17	0.11	1.7	0.81	0.039
60	4.61	0.36	0.13	0.06	0.07	0.8	1.28	0.049
70	4.71	0.45	0.2	0.04	0.05	0.3	0.4	0.068
80	4.88	0.76	0.7	0.05	0.07	0.4	0.27	0.133

b) Tage	pH	Al /	Fe /	Ca /	Mg $\mu\text{g/g}$	K /	Na /	nm
10	4.09	37.1	1.96	1.32	0.31	22.4	7.23	0.107
20	4.19	7.7	1.21	1.2	0.22	12.2	4.11	0.066
30	4.17	5.24	0.51	0.31	0.14	5.3	1.85	0.047
40	4.4	2.02	0.2	0.27	0.15	2.7	1.25	0.05
50	4.54	0.69	0.06	0.1	0.1	1.9	0.77	0.04
60	4.61	0.61	0.07	/	0.06	1.0	1.09	0.056
70	4.72	0.26	/	/	0.05	0.2	/	0.072
80	4.93	1.08	1.07	0.05	0.06	0.6	0.63	0.159

Fortsetzung Tab. A.26.:

Horizont: Bv

a) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Huminstoff- Extinktion nm
		/	/	/	$\mu\text{g/g}$	/	/	
10	4.43	18.4	0.77	0.3	0.14	14.4	5.12	0.035
20	4.47	3.41	0.57	0.34	0.09	6.0	2.38	0.02
30	4.55	0.8	/	0.06	0.06	2.3	0.71	0.017
40	4.69	0.45	0.04	0.1	0.07	1.3	0.5	0.013
50	4.88	0.19	0.04	0.08	0.06	0.5	0.48	0.015
60	5.03	/	0.01	0.03	0.04	1.0	0.97	0.024
70	5.17	0.25	0.06	0.01	0.02	0.2	0.12	0.035
80	5.32	1.43	1.06	/	0.05	/	/	0.135

b) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	nm
		/	/	/	$\mu\text{g/g}$	/	/	
10	4.36	22.2	0.83	0.53	0.16	16.0	5.67	0.043
20	4.48	1.86	0.1	0.43	0.12	7.0	2.65	0.024
30	4.44	2.63	0.58	0.05	0.08	2.8	1.07	0.023
40	4.71	0.93	/	0.13	0.1	1.2	0.91	0.015
50	4.93	0.39	/	0.09	0.1	1.0	1.03	0.016
60	4.92	0.25	/	/	0.04	0.3	0.12	0.023
70	5.16	0.22	/	0.05	0.04	0.2	/	0.037
80	5.19	0.72	0.48	/	0.04	0.1	0.04	0.081

Standort: Hoher Bogen (Amphibolit); Profil D $\hat{=}$ Podsol-Braunerde

Horizont: A(e)h

a) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Huminstoff- Extinktion nm
		/	/	/	$\mu\text{g/g}$	/	/	
10	3.64	38.0	27.7	1.02	0.65	24.2	7.68	0.25
20	3.7	8.34	21.78	0.85	0.41	12.2	4.03	0.164
30	3.82	3.56	7.48	0.32	0.29	6.5	1.97	0.096
40	3.94	1.81	3.54	0.31	0.24	3.9	1.59	0.088
50	4.12	0.61	1.66	0.21	0.16	2.2	1.19	0.094
60	4.18	0.4	0.99	0.06	0.12	1.0	0.57	0.122
70	4.4	0.62	0.84	0.04	0.1	0.4	1.89	0.184
80	4.53	4.78	3.77	0.03	0.25	0.4	/	0.473

b) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	nm
		/	/	/	$\mu\text{g/g}$	/	/	
10	3.61	34.6	27.1	0.96	0.56	23.7	7.26	0.229
20	3.74	6.31	28.46	0.96	0.4	12.1	4.03	0.143
30	3.79	3.92	8.6	0.23	0.29	6.1	1.94	0.105
40	3.99	1.91	3.67	0.21	0.25	2.9	1.3	0.091
50	4.14	0.88	1.93	0.11	0.21	2.0	1.04	0.097
60	4.21	0.52	1.05	0.02	0.13	1.3	0.46	0.119
70	4.35	0.82	0.86	0.89	0.21	0.7	/	0.183
80	4.52	2.62	2.66	/	0.15	0.6	0.25	0.337

Horizont: B(s)v

a) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Huminstoff- Extinktion nm
		/	/	/	µg/g	/	/	
10	4.23	35.2	1.5	0.48	0.24	19.8	6.39	0.094
20	4.3	9.16	0.99	0.58	0.15	9.4	3.2	0.047
30	4.36	4.11	0.27	0.11	0.1	4.9	1.53	0.033
40	4.5	1.57	0.07	0.14	0.08	2.6	1.0	0.026
50	4.66	0.39	0.04	0.08	0.06	1.4	0.45	0.026
60	4.73	0.34	0.05	0.03	0.04	0.6	0.91	0.033
70	4.91	0.15	0.07	0.01	0.03	0.2	1.08	0.046
80	4.99	0.95	0.54	0.03	0.05	0.1	/	0.094

b) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	nm
		/	/	/	µg/g	/	/	
10	4.22	41.9	1.54	0.73	0.28	22.7	7.27	0.102
20	4.31	10.6	1.27	0.76	0.19	13.4	4.17	0.062
30	4.28	6.25	0.34	0.16	0.12	6.0	2.01	0.041
40	4.49	2.98	0.27	0.19	0.11	2.3	1.14	0.033
50	4.65	1.12	0.01	0.1	0.1	2.0	1.02	0.027
60	4.63	0.64	/	/	0.06	1.1	0.46	0.029
70	4.81	0.23	/	/	0.03	0.5	/	0.037
80	4.95	0.18	0.06	/	0.04	0.4	0.22	0.048

Horizont: Bv

a) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	Huminstoff- Extinktion nm
		/	/	/	µg/g	/	/	
10	4.41	25.5	1.31	0.31	0.18	17.9	5.92	0.042
20	4.4	7.68	0.78	0.34	0.13	8.4	3.19	0.022
30	4.41	3.98	0.3	0.07	0.08	3.5	1.15	0.017
40	4.51	2.19	0.02	0.11	0.09	2.0	0.79	0.01
50	4.59	0.88	0.04	0.11	0.08	1.0	0.54	0.009
60	4.64	0.45	0.13	0.05	0.07	1.0	0.71	0.012
70	4.9	0.17	0.08	0.04	0.06	0.4	1.49	0.015
80	4.95	0.24	/	0.03	0.05	/	/	0.009

b) Tage	pH	Al	Fe	Ca	Mg	K	Na	nm
		/	/	/	µg/g	/	/	
10	4.41	26.5	2.46	0.56	0.2	19.7	6.56	0.047
20	4.48	4.62	0.82	0.36	0.12	8.4	2.97	0.023
30	4.39	4.31	0.07	/	0.08	3.3	1.12	0.017
40	4.57	2.56	/	0.13	0.11	1.0	0.66	0.014
50	4.72	0.97	0.01	0.07	0.1	1.6	0.98	0.011
60	4.67	0.66	/	0.01	0.07	0.5	0.99	0.009
70	4.83	0.13	/	0.06	0.06	0.2	/	0.015
80	4.94	0.16	/	/	0.05	0.3	0.27	0.009

LEBENS LAUF:

Claudia Hofmann-Schielle
geb. am 22.02.1958
in Ludwigsburg
Familienstand: verheiratet

Schulbildung:

1964-1967 Grundschule Immenstaad/Bodensee
1967-1968 Grundschule München-Allach
1968-1977 Neusprachliches Gymnasium Maria-Ward,
München-Nymphenburg

Berufsausbildung:

1977-1983 Studium der Geologie an der Technischen
Universität München.

Seit 1.09. 1983 am Lehrstuhl für Bodenkunde und Standortlehre der
Forstwissenschaftlichen Fakultät als wissenschaftlicher Mitarbeiter
tätig.

1985-1988 Anfertigung der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl.

